SYSTEMY EMBEDDED I KOMPUTERY JEDNOPŁYTKOWE • ROBOTYKA

www.ep.com.pl

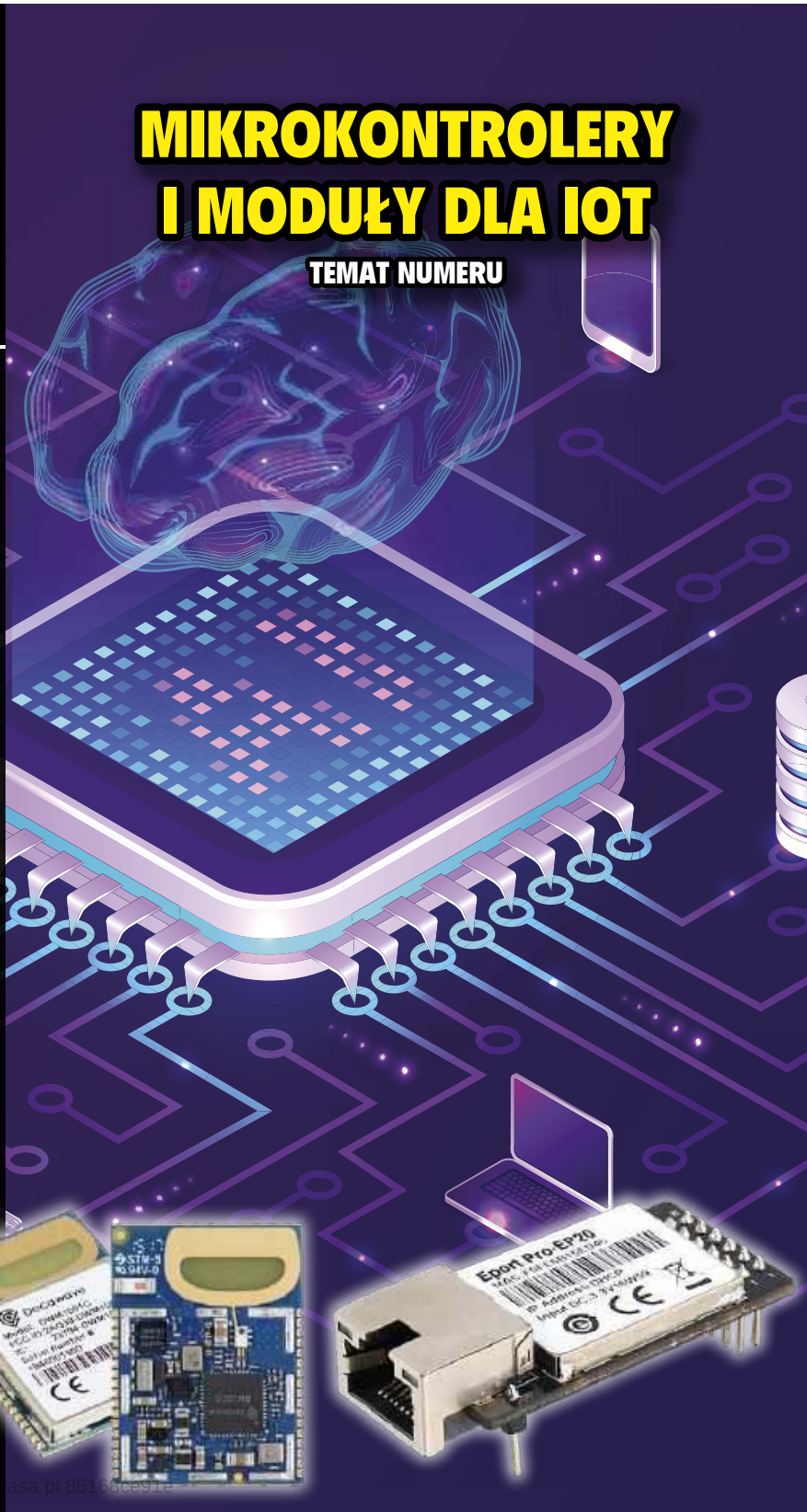
ELEKTRONIKA PRAKTYCZNA +FTP

● Międzynarodowy magazyn elektroników konstruktorów ● Listopad ● 11/2020 ●

EP W TOKU
NA EP.COM.PL

tylko Prenumeratorzy
mają dostęp do artykułów przed ich publikacją w EP

MIKROKONTROLERY I MODUŁY DLA IOT
TEMAT NUMERU



inspirujące, użyteczne projekty
Koci robot sterowany modułem ESP32 • Odtwarzacz audio z Raspberry Pi • Shield z Ethernetem do płytki uruchomieniowej Rysino z układem FPGA Intel Max10 • Volta – miniaturowy woltomierz • Moduł z pamięcią EERAM • Płytka bazowa dla Arduino MKR • Miniaturowy stabilizator impulsowy

podzespoły, sprzęt, aplikacje
Mikrokontrolery i moduły dla IoT • Moduły HighFlying w ofercie firmy Micros • Nowe zestawy do IOT od firmy Kradex odpowiedzią na zapotrzebowania rynku elektronicznego • STM32WL, czyli mikrokontroler + sub-GHz RF + LoRa w jednej obudowie • Bezpieczne mikrokontrolery i moduły dla IoT • Systemy akwizycji danych LabJack • VisionSOM-8Mmini – multimedialny system embedded firmy SoMLabs • Komputery jednopłytkowe • Zależności czasowe w nowoczesnych robotach wieloosiowych • Łazik marsjański HAL-062. Projekt Koła Naukowego Robotyków KNR działającego przy Wydziale Mechanicznym Politechniki Warszawskiej • Oczy robota. Postrzeganie świata przez maszyny autonomiczne • Moduły inercyjne w robotyce

tutoriale
Symulacja i pomiar, czyli LTspice i Analog Discovery 2 w rękach konstruktora. Generowanie przebiegu sinusoidalnego

kursy
Eksperymenty z FPGA. Dyskretna transformata Fouriera

18,90 zł (w tym 8% VAT) • PRICE: 8 EUR
ISSN 1230-3526 Indeks 357677
9 771230 352207 11 >

PRENUMERUJ!

Standardowe ceny prenumerat:

- roczna – 207,90 zł (1 wydanie gratis)
- dwuletnia – 340,20 zł (6 wydań gratis)

Po latach nawet **ZA PÓŁ CENY!**

Wieloletni Prenumerator po kilku latach nieprzerwanej prenumeraty zyskuje **DO 50% ZNIŻKI**. Jeśli prenumerujesz EP, wszystkie dane nt. swojej prenumeraty znajdziesz teraz po zalogowaniu na www.avt.pl/prenumerata. Co szczególne ważne – znajdziesz tam również propozycje przedłużenia Twojej prenumeraty, które uwzględniają przysługujące Ci zniżki.

PREZENT do każdej opłaconej prenumeraty: koszulka lub płyta

Prenumerata	bez zniżki lojalnościowej	ze zniżką lojalnościową, jeżeli prenumerujesz nieprzerwalnie			
		od roku	od 2 lat	od 3 lat	od 5 lat
roczna	207,90 zł 1 wydanie gratis	189,00 zł 2 wydania gratis	170,10 zł 3 wydania gratis	151,20 zł 4 wydania gratis	
dwuletnia	340,20 zł 6 wydań gratis			283,50 zł 9 wydań gratis	226,80 zł **12 wydań gratis**

E-prenumerata, czyli **NAJSZYBSZY DOSTĘP**

Uzyskaj dostęp do najnowszego numeru – nawet 5 dni przed ukazaniem się pisma w kioskach!

Prenumerata roczna wersji cyfrowej (PDF) kosztuje 151,00 zł (2 e-wydania gratis), dwuletnia – 271,80 zł zł (6 e-wydań gratis).

Prenumeratorzy wersji drukowanej za równoległe e-wydania płacą jedynie 20% ceny: opłata za e-prenumeratę równoległą wynosi 36,20 zł/rok i 72,40 zł/2 lata.

Korzystaj też z innych **przywilejów PRENUMERATORA**

- **prezent** – każdorazowo opłacenie prenumeraty jest premiowane prezentem. W tym numerze są to do wyboru:
  - koszulka z logo EP (rozm. L, XL) lub
  - płyta Kandace Springs „The Women Who Raised Me". Zamów swój prezent mailowo – prenumerata@avt.pl.
- do 50% zniżki w Sklepie AVT (szczegóły na www.avt.pl/klub-elektronika)
- prenumeratorzy mają od 30 do 50% zniżki na zakupy na www.UlubionyKiosk.pl (wystarczy podczas zamówienia powołać się na swój numer prenumeraty)
- jeśli zamawiasz prenumeratę drukowaną na www.avt.pl po raz pierwszy lub przedłużasz ją po zalogowaniu do swojego Panelu Prenumeratora, otrzymasz kody rabatowe na bezpłatne pobranie e-wydań z oferty www.UlubionyKiosk.pl (szczegóły na www.avt.pl)

Zamów prenumeratę EP w dogodny sposób:

• na www.avt.pl • poprzez wpłatę na konto: AVT-Korporacja sp. z o.o.,ul. Leszczynowa 11, 03-197 Warszawa, ING Bank Śląski 18 1050 1012 1000 0024 3173 1013 • mailowo: prenumerata@avt.pl

Administratorem Twoich danych osobowych jest AVT-Korporacja sp. z o.o., ul. Leszczynowa 11, 03-197 Warszawa, prenumerata@avt.pl.

Przetwarzamy Twoje dane, aby móc wysłać Ci nasze czasopisma w formie drukowanej lub elektronicznej oraz inne towary (np. prezenty), a także w innych prawnie usprawiedliwionych celach, w tym marketingu bezpośredniego naszych produktów i usług (tzw. uzasadniony interes administratora). Podanie danych jest dobrowolne, ale niezbędne do zrealizowania zamówienia na prenumeratę.

Twoje dane osobowe przekazujemy Poczcie Polskiej, która dostarcza do Ciebie przesyłki. Bez Twojej zgody nie przekażemy i nie będziemy dokonywać obrotu (nie użyczymy, nie sprzedamy) Twoich danych osobowych innym osobom lub instytucjom. Twoje dane osobowe możemy przekazać jedynie podmiotom uprawnionym do ich uzyskania na podstawie obowiązującego prawa (np. sądy lub organy ścigania) – ale tylko na ich żądanie w oparciu o stosowną podstawę prawną. Będziemy przetwarzać Twoje dane osobowe przez 5 lat od zakończenia roku obrachunkowego, w którym wystąpiła ostatnia płatność. Dane osobowe do celów marketingowych będziemy przetwarzać do czasu wycofania przez Ciebie zgody na przetwarzanie lub do czasu usunięcia danych.

Informujemy, że masz prawo do żądania od administratora dostępu do Twoich danych, ich sprostowania, usunięcia, ograniczenia ich przetwarzania, wniesienia sprzeciwu wobec przetwarzania Twoich danych lub ich przenoszenia. W każdej chwili możesz odwołać zgodę na przetwarzanie Twoich danych osobowych oraz możesz zażądać, by Twoje wszystkie dane zostały przez nas usunięte.

eprasa.pl 85168ce91e

Robot... czyli co?

Jednym z głównych tematów listopadowego wydania EP jest robotyka, dziedzina nauki zajmująca się projektowaniem i zastosowaniem robotów. Mnogość stosowanych technologii, rozwiązań sprzętowych i programowych, oraz zastosowań, dla urządzeń określanych mianem robota jest ogromna i spycha w cień robota postrzeganego jako humanoidalna maszyna. Cechami wspólnymi przeważającej większości konstrukcji zaklasyfikowanych do tej dziedziny, jest zdolność do poruszania elementami tej konstrukcji – mechanicznymi kończynami czy manipulatorami umożliwiającymi interakcję ze światem fizycznym, oraz ściśle określone przeznaczenie, które zawsze ma na celu zastąpienie człowieka w jego pracach. Nie można nie zgodzić się z definicją z Wikipedii, która włącza do tej kategorii, także programy komputerowe, które wykonują trudne, czasochłonne i monotonne zadania za człowieka. Takie programy są dziś dosyć powszechne i nazywamy je botami.

Idea maszyny zastępującej człowieka w wykonywaniu określonych zadań pojawiła się już za czasów Leonarda da Vinci, który zaprojektował maszynę przypominającą człowieka-rycerza. Natomiast pierwsze współczesne roboty zaczęły powstawać w drugiej połowie XX wieku. Manipulator, mechaniczne ramię, choć zastępuje człowieka w wykonywaniu jego prac, jeśli wymaga nieprzerwanego sterowania przez operatora, jest jak narzędzie i trudno nazwać je robotem. Jednak w taki sposób działa wiele zrobotyzowanych pojazdów, np. łaziki czy roboty saperskie. To samo mechaniczne ramię, sterowane komputerem, wykonujące zaprogramowaną sekwencję ustawioną przez operatora, jest raczej automatem i nazwanie go robotem może budzić pewien sprzeciw. Jednak takie automaty od dawna funkcjonują jako roboty przemysłowe.

Od robota oczekujemy pewnego poziomu autonomiczności. Im bardziej skomplikowane zadania ma wykonywać, tym powinien być bardziej samodzielny i reagować odpowiednio do panujących warunków. To mocno komplikuje jego budowę, ponieważ wymaga systemu czujników dostarczających informacji np. o położeniu, otoczeniu i innych parametrach mających wpływ na podejmowanie akcji. Najwięcej informacji dostarczają systemy wizyjne z kamerami i radary laserowe. Analiza tak złożonych sygnałów wymaga dużej mocy obliczeniowej komputera sterującego oraz zaawansowanego oprogramowania, a wręcz mechanizmów bazujących na sztucznej inteligencji. Niektóre interpretacje robotyki utożsamiają ją ze sztuczną inteligencją. Jednak zastosowanie tej nowoczesnej technologii w jednym z podsystemów nie oznacza, że robot zyskuje jej cechy. Poza tym marzenie, które na lata zdominowało fantastykę naukową, o robotach myślących, czyli także odczuwających emocje i decydujących o swym losie, jest sprzeczne z naszymi wymaganiami. Robot musi być systemem, który można zaprogramować, określić jego zadania oraz sposób postępowania, bez pozostawiania mu zbytniej swobody.

Wyposażone w najnowsze zdobycze techniki, sterowane wydajnymi komputerami i wspomagane sztuczną inteligencją, roboty doskonale zastępują ludzi w ich zadaniach. Właściwie to przewyższają ludzi w wielu aspektach, m.in. precyzją, wydajnością, niezawodnością, łatwością kontroli oraz pod względem ekonomicznym, a także pozwalają dokonywać rzeczy, których ludzie nie byli w stanie dokonać. Już teraz doświadczamy zjawiska zastępowania niektórych zawodów i stanowisk maszynami-robotami, widać to zwłaszcza na liniach produkcyjnych koncernów samochodowych. Z autami wiąże się także pewna rewolucja, która zbliża się wielkimi krokami i dotyczy robotów nazywanych pojazdami autonomicznymi. Trudno teraz spekulować, jak daleko pozwolimy robotom wejść w nasze życie, ale osoby zajmujące się robotyką na pewno będą miały pełne ręce roboty.

Damian Soszowski

Fotografia 1. Robot sterowany przez człowieka

Fotografia 2. Robot autonomiczny przeznaczony do dostarczania przesyłek

Fotografia 3. Robot dysponujący sztuczną inteligencją

eprasa.pl 85168ce91e

ELEKTRONIKA PRAKTYCZNA

Nr 11 (334) • Listopad 2020

Nie przeocz

Nowe podzespoły ... 6

Koktajl niusów ... 12

Dodaj do obserwowanych ... 15

Projekty soft

Koci robot sterowany modułem ESP32 ... 20

Projekty

Odtwarzacz audio z Raspberry Pi (2) ... 24

Shield z Ethernetem do płytki uruchomieniowej Rysino z układem FPGA Intel Max10 ... 29

Volta – miniaturowy woltomierz ... 33

Miniprojekty

Moduł z pamięcią EERAM ... 38

Płytka bazowa dla Arduino MKR ... 40

Miniaturowy stabilizator impulsowy ... 41

Temat numeru: mikrokontrolery i moduły dla IoT

Mikrokontrolery i moduły dla IoT ... 46

Prezentacje

Systemy akwizycji danych LabJack ... 43

Nowe zestawy do IOT od firmy Kradex odpowiedzią na zapotrzebowania rynku elektronicznego ... 66

Moduły HighFlying w ofercie firmy Micros ... 67

STM32WL, czyli mikrokontroler + sub-GHz RF + LoRa w jednej obudowie ... 70

Bezpieczne mikrokontrolery i moduły dla IoT ... 75

VisionSOM-8Mmini – multimedialny system embedded firmy SoMLabs ... 85

Koci robot sterowany modułem ESP32

Konstrukcje robotów od dawna są wzorowane na naturze. Na rynku pojawiło się już wiele robotów, nawiązujących swoją konstrukcją do różnych zwierząt. Zaprezentowany w artykule robot wzorowany jest na kocie.

Wybór konstruktora:

Komputery jednopłytkowe ... 88

Zależności czasowe w nowoczesnych robotach wieloosiowych ... 99

Oczy robota. Postrzeganie świata przez maszyny autonomiczne ... 102

Moduły inercyjne w robotyce ... 105

Łazik marsjański HAL-062. Projekt Koła Naukowego Robotyków KNR działającego przy Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej ... 110

Notatnik konstruktora

Symulacja i pomiar, czyli LTspice i Analog Discovery 2 w rękach konstruktora (16). Generowanie przebiegu sinusoidalnego ... 80

Kursy

Eksperymenty z FPGA (12). Dyskretna transformata Fouriera ... 116

Prenumerata ... 2

Od wydawcy ... 3

Kramik i rynek ... 115

Hity następnego numeru ... 119

Aby pobrać materiały dodatkowe do artykułów, zarejestruj się na https://media.avt.pl

Szczegóły na stronie 79

eprasa.pl 85168ce91e

Laserowe sensory gestów i odległości

Flight Sense

Najważniejsze cechy optycznych sensorów odległości i gestów

- maksymalny zasięg pomiaru 50 cm...4 m
- opatentowany algorytm pomiaru odległości FlightSense
- dostępne modele wykrywające jednocześnie wiele obiektów
- możliwość konfiguracji stref czułości
- zintegrowane sensory natężenia oświetlenia
- zintegrowana dioda laserowa
- częstotliwość skanowania do 60 Hz
- niewielki pobór mocy
- miniaturowe wymiary - od 4.4 x 2.4 x 1 mm

Ekosystem narzędziowy

- zestawy ewaluacyjne z rodziny X-NUCLEO
- API w C portowalne na dowolną platformę
- algorytmy rozpoznawania gestów
- narzędzia do konfiguracji sensorów

Dostępne modele

- VL6180 - sensor zbliżeniowy o zasięgu do 50 cm
- VL53L0CX - pomiar odległości obiektu do 2 m
- VL53L3CX - wielopunktowy sensor zbliżeniowy o zasięgu do 3 m
- VL53L1CX - pomiar odległości obiektu do 4 m
- VL53L1CB - wielopunktowy pomiar odległości obiektów do 3.2 m

KAMAMI DEVELOPMENT BOARD

life.augmented

www.st.com/flightsense

eprasa.pl 85168ce91e

nowe podzespoły

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

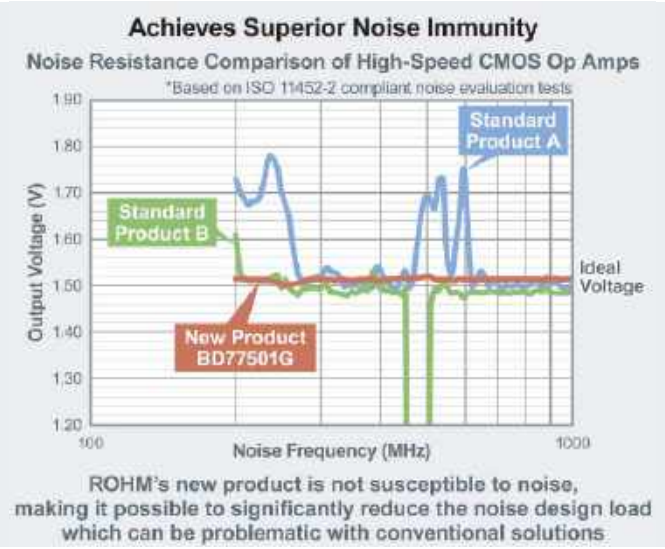
Pierwszy kondensator ceramiczny o pojemności 1 F w obudowie rozmiaru 0402

Firma Murata wyprodukowała najmniejszy na rynku kondensator ceramiczny MLCC o pojemności 1 F, zamykany w obudowie SMD 01005 (0402M) o wymiarach zaledwie 0,4×0,2×0,2 mm. Obecnie do masowej produkcji weszła wersja 4-woltowa (ozn. GRM022R60G105ME01), natomiast w 2021 roku ma się pojawić wersja o napięciu znamionowym 6,3 V, oznaczona symbolem GRM022R60J105M. Nowy kondensator jest dwukrotnie mniejszy pod względem objętości oraz charakteryzuje się mniejszą o 35% powierzchnią montażową od wcześniejszego odpowiednika w obudowie 05025M wprowadzonego na rynek w 2016 roku. Został on wyprodukowany na bazie dielektryka X5R. Nadaje się do pracy w przemysłowym zakresie temperatur otoczenia od –40 do +85°C.

http://bit.ly/2MJM9NK

Wzmacniacz operacyjny CMOS o bardzo małych oscylacjach wyjściowych

Do rodziny niskoszumowych komparatorów i wzmacniaczy operacyjnych EMARMOUR firmy Rohm Semiconductor wchodzi nowy wzmacniacz CMOS oznaczony symbolem BD77501G. Układ przeznaczony jest do wykrywaniu anomalii sygnałów generowanych przez czujniki niskonapięciowe. W odróżnieniu od konwencjonalnych, szybkich wzmacniaczy operacyjnych, podatnych na oscylacje wynikające z obciążenia pojemnościowego (pochodzące m.in. od okablowania), charakteryzuje się on stabilnym sygnałem wyjściowym w szerokim zakresie pojemności, do nanofaradów.



Układ BD77501G jest pierwszym na rynku szybkim wzmacniaczem operacyjnym, nie tylko zapewniającym wysoki współczynnik slew rate (10 V/s), niezbędny przy wykrywaniu anomalii sygnałów, ale również eliminującym problem oscylacji powodowanych przez obciążenia pojemnościowe. Ponadto charakteryzuje się on 10-krotnie mniejszymi fluktuacjami napięcia wyjściowego (20 mV vs. 200 mV) od konwencjonalnych wzmacniaczy w całym zakresie częstotliwości pracy. Dzięki zwiększonej odporności na zaburzenia elektromagnetyczne nie wymaga zewnętrznych filtrów RC na liniach wejściowych, wyjściowych i zasilania, co pozwala wyeliminować nawet do 10 komponentów współpracujących w porównaniu ze wzmacniaczami konwencjonalnymi (dla wzmacniacza jednokanałowego).

Typowe zastosowania BD77501G obejmują detektory gazów, czujniki prądowe, układy sterowania silników i falowników, bufory w układach sterowania tranzystorów oraz inne aplikacje przemysłowe i komercyjne, wymagające szybkiej transmisji sygnałów. Układ jest zamykany w obudowie SSOP5 o wymiarach 2,9×2,8×1,25 mm.

http://bit.ly/2r2c2zY

Przekaźnik półprzewodnikowy o napięciu znamionowym 800 V

Littelfuse powiększa ofertę przekaźników półprzewodnikowych rodziny OptoMOS o nowy model PLA172P o rekordowym napięciu znamionowym, wynoszącym 800 V. Jest to przekaźnik jednobiegunowy NO zamykany w 6-wyprowadzeniowej obudowie SSR Flatpage o wymiarach 9,7×9,4×2,7 mm z dużą separacją (6,8 mm) pomiędzy wyprowadzeniami

REKLAMA

BORNICO | Teraz większe MOŻLIWOŚCI
bornico.com.pl
montaż kontraktowy elektroniki
projektowanie urządzeń i systemów
Zakład Elektroniczny BORNICO
ul. Małęczyńska 25
26-600 Radom
tel. +48 48 365 58 22
bornico@bornico.com.pl

eprasa.pl 85168ce91e

Wstępnie skonfigurowane rozwiązania zabezpieczające w zasięgu ręki

Platforma zaufana dla rodziny CryptoAuthentication™

Platforma zaufana (Trust Platform) dla rodziny CryptoAuthentication™ umożliwia integrację sprzętowego bezpiecznego magazynu kluczy z wstępnie skonfigurowanymi lub wstępnie udostępnionymi układami dla projektów o małej, średniej i dużej skali produkcji. Trzy opcje platformy pozwalają wybrać dokładnie taki model uwierzytelniania, który odpowiada potrzebom Twojego systemu: Trust&GO jest wstępnie wyposażony w domyślne certyfikaty i klucze; TrustFLEX został wstępnie skonfigurowany pod najczęstsze przypadki użycia uwierzytelniania i umożliwia korzystanie z preferowanej jednostki certyfikującej; natomiast TrustCUSTOM zapewnia w pełni konfigurowalne rozwiązanie.

Właściwości:

- Trust&GO - wstępnie udostępniony
- TrustFLEX - wstępnie skonfigurowany pod najpopularniejsze przypadki wykorzystania
- TrustCUSTOM – pozwala na dostosowanie do wymagań użytkownika
- Bezpieczne przechowywanie kluczy zgodne z JIL common criteria

TRUST &GO

TRUST FLEX

TRUST CUSTOM

www.microchip.com/TrustPlatform

MICROCHIP

Nazwa i logo Microchip oraz logo Microchip są zastrzeżonymi znakami towarowymi, a CryptoAuthentication jest znakiem towarowym firmy Microchip Technology Incorporated w USA i innych krajach. Wszystkie inne znaki towarowe są własnością ich zarejestrowanych właścicieli. © 2020 Microchip Technology Inc. Wszelkie prawa zastrzeżone. DS00003273A. MEC2317A-POL-10-20

eprasa.pl 85168ce91e

nisko- i wysokonapięciowymi, zapobiegającą powstawaniu wyładowań łukowych. Ze względu na szeroki zakres dopuszczalnej temperatury pracy od –40 do +105°C może on znaleźć wiele zastosowań w aplikacjach przemysłowych, aparaturze medycznej, instalacjach solarnych itp., zastępując większe i bardziej podatne na uszkodzenia przekaźniki elektromechaniczne. Zapewnia izolację do 5000 V rms między liniami wejściowymi i wyjściowymi oraz mały prąd wejściowy (5 mA) i prąd upływu (5 μA) w szerokim zakresie temperatury pracy. Jego maksymalny prąd obciążenia wynosi 100 mA rms. Dopuszczalne napięcie pracy, zwiększone z 600 V do 800 V w stosunku do wcześniejszych wersji, zapewnia dodatkowy margines bezpieczeństwa w instalacjach AC o wysokim poziomie szumów i wysokonapięciowych układach monitorowania akumulatorów.

http://bit.ly/30xLIvp

Optyczny system akwizycji danych do pomiaru tętna i SpO_2

Układ MAXM86146 to najmniejszy na rynku optyczny system akwizycji danych o dużej skali integracji, zawierający głowicę analogową (AFE), mikrokontroler ARM Cortex-M4 i dwie fotodiody o dużej czułości. Może on znaleźć zastosowanie przy realizacji wszelkiego typu opasek sportowych i innych gadżetów przenośnych do pomiaru pulsu i nasycenia krwi tlenem oraz do klasyfikowania aktywności użytkownika, pozwalając ograniczyć liczbę podzespołów, zmniejszyć powierzchnię płytki drukowanej i skrócić czas projektowania urządzeń. MAXM86146 jest produkowany w obudowie OLGA-38 o wymiarach 4,5×4,1×0,88 mm, pozwalającej niemal dwukrotnie zmniejszyć grubość podzespołów w porównaniu z analogicznym systemem realizowanym na bazie podzespołów dyskretnych. Zawiera zestaw wbudowanych algorytmów pomiarowych, spełniających wymogi kryteriów medycznych. Aktualizowanie algorytmów i oprogramowania firmware odbywa się z wykorzystaniem protokołu I²C. W ofercie firmy Maxim dostępny jest zestaw ewaluacyjny MAXM86146EVSYS#.

http://bit.ly/2PgfSj6

REKLAMA

Szybkie regulatory napięcia o 10-krotnie większej gęstości prądu od układów konkurencyjnych

Firma Empower Semiconductor zaprezentowała serię rewolucyjnych regulatorów napięcia EP70xx charakteryzujących się 10-krotnie większą gęstością prądu i 1000-krotnie szybszym dynamicznym skalowaniem napięcia od najlepszych odpowiedników z oferty innych producentów. Regulatory EP70xx mogą zapewnić znaczącą oszczędność energii w układach zasilania serwerów, centrów danych, procesorów AI oraz sieciowych i komunikacyjnych układów SoC. Pracują z napięciem zasilania 1,8 V i z napięciem wyjściowym programowanym w zakresie od 0,4 do 1,3 V. Występują w wersjach jedno-, dwu- i trójwyjściowych o sumarycznej wydajności prądowej do 10 A, zamykanych w obudowach o powierzchni od 4×4 mm do 5×5 mm i grubości wynoszącej zaledwie 0,75 mm, nawet 5-krotnie mniej od tradycyjnych zintegrowanych modułów zasilania. Zapewniają sprawność sięgającą 91%, stałą w szerokim zakresie obciążeń. Ponadto nie wymagają dołączania żadnych elementów zewnętrznych. Konfiguracja parametrów pracy odbywa się z wykorzystaniem dostarczanego przez producenta interfejsu graficznego (GUI) i portu I³C/I²C.

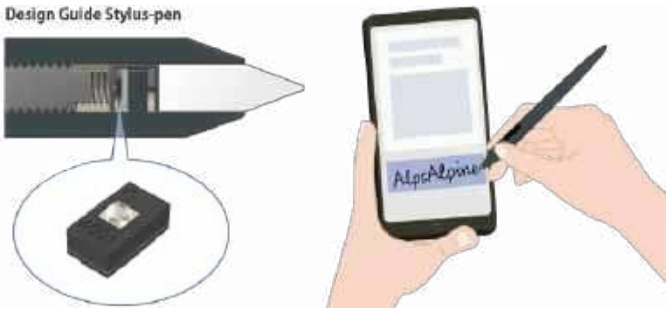
Podstawowe cechy:

- gęstość prądu: 0,4 A/mm²,
- dokładność napięcia wyjściowego: ±1,0%,
- ultraszybka odpowiedź impulsowa (brak kondensatorów wyjściowych),
- zabezpieczenie nadnapięciowe, podnapięciowe, nadprądowe i zwarciowe,
- dokładność pomiaru: ±10% (prąd); ±2% (napięcie); ±4% (temperatura),
- szybki układ miękkiego startu o małym prądzie wejściowym,

eprasa.pl 85168ce91e

- programowana kolejność załączania wejść,
- możliwość synchronizacji z zewnętrznym zegarem,
- interfejs I³C (28 MHz).

https://bit.ly/34ZSqgk



Precyzyjny, miniaturowy czujnik siły

Alps Alpine rozpoczyna masową produkcję nowego, miniaturowego czujnika siły o oznaczeniu HSFPAR007A, zaprojektowanego do zastosowań m.in. w rysikach smartfonów. Jest to najmniejszy układ z całej rodziny czujników HSFPAR, zamykany w obudowie o powierzchni 1,5×0,85 mm, mniejszej o ponad połowę od powierzchni wcześniejszej wersji HSFPAR004A wprowadzonej na rynek w marcu 2019. Charakteryzuje się dużą czułością, rozdzielczością i liniowością, pozwalając precyzyjnie oddać nacisk wywierany przez użytkownika podczas dotyku ekranu. Jest równocześnie czujnikiem niezwykle odpornym na udary mechaniczne. Jest w stanie wykryć nacisk o sile już od 0,01 N, co pozwala na zastosowania również w precyzyjnych ramionach robotów. Charakteryzuje się zakresem pomiarowym 8 N, długim czasem bezawaryjnej pracy, wynoszącym ponad 1 milion cykli mechanicznych (@ 8 N) i błędem nieliniowości 2% FS. Jest niewrażliwy na działanie zewnętrznych pól elektromagnetycznych. Wytrzymuje maksymalną siłę nacisku 55 N.

https://bit.ly/3k4qaiO

Kondensatory do magazynowania energii ENYCAP w mniejszych obudowach

Kondensatory do magazynowania energii ENYCAP firmy Vishay są obecnie produkowane w 7 nowych wariantach obudów o wymiarach od Ø 10×20 mm do Ø 12,5×40 mm. Są to kondensatory o pojemności od 5 do 22 F, znajdujące zastosowanie w miernikach energii elektrycznej, robotyce oraz systemach energy harvest i zasilania awaryjnego, wyróżniające się krótkim czasem ładowania i rozładowania. Uzyskały kwalifikację AEC-Q200 pozwalającą na zastosowania w instalacjach samochodowych. Występują w czterech wykonaniach: standardowym (220 EDLC), ruggedized (225 EDLC-R) o zwiększonej odporności na wilgoć, wysokonapięciowym (230 EDLC-HV) oraz wysokonapięciowym o zwiększonej odporności na wilgoć (235 EDLC-HVR).

Kondensatory ENYCAP zapewniają użyteczny czas życia do 2000 h w temperaturze +85°C. Wersje ruggedized (ozn. –R) przeszły 1500-godzinny test niezawodnościowy w warunkach wysokiej temperatury i wilgotności (85°C/85%RH). Z kolei wersje –HV charakteryzują się napięciem znamionowym zwiększonym w stosunku do wersji standardowych (3,0 V vs. 2,7 V).

http://bit.ly/2kulw4r

REKLAMA

COMPUTER CONTROLS

Oficjalny dystrybutor **armKEIL** w Polsce.

arm KEIL

Nowości w wersjach MDK v5.31 i v5.32

- *wsparcie dla rdzeni Cortex-M55*
- *kompilator ARM 6.14*
- *zmiany w zakresie systemu plików, komponentów USB, sieciowych i graficznych oraz oprogramowania pośredniego MDK 7.11.1*
- *Fixed Virtual Platforms - modele symulacyjne - zaktualizowano do wersji 11.10.22*
- *µVision - ulepszona edycja w obszarach roboczych obejmujących wiele projektów*
- *MDK v5.32 do pobrania jest z paczkami: ARM.CMSIS.5.7.0, ARM.CMSIS-Driver.2.6.1, Keil.MDK-Middleware.7.12.0*
- *najnowsze aktualizacje dla Segger J-Link 6.70e oraz Nuvoton NULink 3.02.6990*

Computer Controls Sp. z o.o.
Bielsko-Biała, ul. Budowlanych 1
tel.: +48 (33) 485 94 90
e-mail: info@ccontrols.pl
www.ccontrols.pl

eprasa.pl 85168ce91e

Oscylator SPXO 1...75 MHz z kwalifikacją samochodową AEC-Q200

Firma Epson powiększa ofertę oscylatorów SPXO (Simple Packaged Crystal Oscillator) do aplikacji motoryzacyjnych o nowy typ oscylatora z wyjściem CMOS, produkowanego na zakres częstotliwości wyjściowych od 1 do 75 MHz. SG2520CAA to oscylator z kwalifikacją AEC-Q200, mogący znaleźć zastosowanie w systemach wspomagania kierowcy (ADAS) oraz kamerach, systemach LiDAR i radarach samochodowych. Zapewnia tolerancję częstotliwości od 50×10^{-6}. Jest produkowany w wersjach przystosowanych do pracy w trzech zakresach dopuszczalnej temperatury otoczenia, z których najszerszy rozciąga się od –40 do +125°C. Pracuje z napięciem zasilania z zakresu od 1,6 do 3,63 V, pobierając maksymalnie 2 mA prądu w stanie aktywnym i 2,7 μA w trybie standby (przy VCC=1,8 V). Jest zamykany w obudowie SMD o wymiarach 2,5×2,0×0,8 mm.

https://bit.ly/2H63rov

33-osiowy czujnik pola magnetycznego

Infineon poszerza ofertę 3-osiowych czujników pola magnetycznego XENSIV o nowy układ, oznaczony symbolem TLI493D-W2BW, nadający się do zastosowań konsumenckich i przemysłowych. Jest on zamykany w obudowie WLB-5 o wymiarach 1,13×0,93×0,59 mm, niewiele większych od wymiarów samej struktury półprzewodnikowej. W porównaniu z wcześniejszymi odpowiednikami cechuje się mniejszą o 87% powierzchnią i mniejszą o 46% wysokością obudowy, co otwiera nowe możliwości zastosowań w urządzeniach o bardzo dużej gęstości upakowania podzespołów.

Układ TLI493D-W2BW może znaleźć zastosowanie w układach komutacyjnych mikrosilników BLDC, joystickach czy konsolach gier. Jest czujnikiem energooszczędnym, pobierającym zaledwie 7 nA prądu w trybie power-down i 3,4 mA w stanie aktywnym. Występuje w 4 wariantach z prekonfigurowanymi adresami. Zapewnia większą rozdzielczość od układów poprzednich generacji. Komunikuje się z mikroprocesorem za pomocą interfejsu I²C i linii przerwania.

http://bit.ly/2lN71bU

Moduł komunikacji bezprzewodowej do samochodowych systemów komunikacyjnych V2X

Firma ublox zaprezentowała najnowszy moduł komunikacji bezprzewodowej zaprojektowany do samochodowych systemów V2X (vehicle-to-everything). VERA-P3 V2X, bazujący na układzie u-blox UBX-P3 V2X, daje producentom OEM z branży motoryzacyjnej oraz producentom infrastruktury zarządzania ruchem możliwość szybkiego integrowania technologii V2X w produktach i ich wdrażania komercyjnego.

Moduł VERA-P3 komunikuje się z wykorzystaniem standardu bezprzewodowej transmisji danych IEEE 802.11p (DSRC w USA, ITS-G5 w Europie), zapewniającego wzajemną łączność pomiędzy pojazdami oraz łączność między pojazdem i infrastrukturą drogową. Może pomagać kierowcom w potencjalnie niebezpiecznych sytuacjach, np. przy spowolnieniu ruchu przed nimi oraz ułatwiać pokonywanie skomplikowanych skrzyżowań. Systemy smart cities również mogą skorzystać z aplikacji V2I (vehicle-to-infrastructure) np. do zarządzania płynnością ruchu drogowego oraz ostrzegania o robotach drogowych i niebezpiecznych lokalizacjach. VERA-P3 nadaje się też do zastosowań w rolnictwie i górnictwie, gdzie ciężkie maszyny muszą się ze sobą komunikować, aby synchronizować swoje działania.

Jako moduł klasy motoryzacyjnej VERA-P3 może pracować w szerokim zakresie temperatury otoczenia od –40 do +105°C. Występuje w wersji z pojedynczym (VERA-P311) i podwójnym (VERA-P321) złączem antenowym. Zawiera interfejsy 3×UART, SPI, SDIO, PPS, Ethernet i 10×GPIO. Jego wymiary wynoszą 29,6×24,8×3,5 mm.

https://bit.ly/2yYYJVa

1500-pikselowe czujniki CCD do systemów AOI i skanerów kodów kreskowych

Do oferty podzespołów optoelektronicznych firmy Toshiba wchodzą dwa nowe czujniki CCD zaprojektowane do zastosowań w systemach automatycznej inspekcji optycznej (AOI) i skanerach kodów kreskowych. TCD1105GFG i TCD1106GFG to czujniki liniowe monochromatyczne o rozdzielczości 1500 pikseli i rozstawie pikseli 5,25 μm, różniące się czułością wynoszącą odpowiednio 125 i 600 V/lx-s oraz zakresem dynamicznym, wynoszącym odpowiednio 90 i 400. Układ TCD1105GFG oferuje dodatkowo funkcję elektronicznej migawki.

Oba czujniki mogą pracować z maksymalną częstotliwością taktowania interfejsu 25 MHz. Zawierają wbudowany generator sygnału zegarowego, pozwalający na ograniczenie liczby elementów współpracujących i wymaganej powierzchni płytki drukowanej. Pracują z napięciem zasilania 3,3 V przy poborze mocy poniżej 90 mV. Są zamykane w 16-wyprowadzeniowych obudowach GLCC o wymiarach 15,2×6,0×2,2 mm.

http://bit.ly/2FVrsKD

Akcelerometr, IMU i czujnik ciśnienia firmy Bosch Sensortec z gwarancją 10-letniej dostępności

W zastosowaniach przemysłowych klienci często wymagają, aby komponenty były dostępne w sprzedaży przez dłuższy czas, zwykle wynoszący 10 lat. Wynika to z długich cykli projektowych, często trwających 2 lata lub więcej, w przypadku których koszt nowego projektu i ponownej kwalifikacji jest istotnym czynnikiem oceny

eprasa.pl 85168ce91e

ryzyka. Aplikacje mogące wymagać przedłużonego czasu dostępności podzespołów to m.in. IoT/IIoT, roboty przemysłowe, sprzęt rolniczy, logistyka, automatyka budynków oraz sprzęt AGD.

Firma Bosch Sensortec oferuje obecnie trzy komponenty w ramach programu przedłużonej, 10-letniej dostępności: moduł inercyjny (IMU) BMI090L, akcelerometr BMA490L oraz czujnik ciśnienia barometrycznego BMP390L.

Moduł BMI090L to system inercyjny wysokiej klasy, przeznaczony do aplikacji IIoT, robotów, sprzętu rolniczego, dronów i urządzeń AGD. Dzięki dużej odporności na wibracje i stabilności w funkcji temperatury może on znaleźć zastosowanie w nawigacji i systemach śledzenia zasobów. Wbudowany żyroskop zapewnia błąd pomiaru mniejszy od 2°/h, co jest unikalne wśród modułów IMU dostępnych obecnie na rynku.

Układ BMA490L to czujnik przyspieszenia przeznaczony do aplikacji IIoT, logistki, robotów rolniczych i przemysłowych, sprzętu AGD oraz elektronarzędzi. Bardzo dobra stabilność temperaturowa, małe szumy wyjściowe hałasu i mały offset sprawiają, że układ idealnie nadaje się do wielu zastosowań, takich jak konserwacja predykcyjna, śledzenie zasobów czy monitorowanie wibracji maszyn. W trybie pracy low-power jego pobór prądu jest ograniczany do 14 μA, co pozwala na zastosowania w aplikacjach określanych mianem always-on.

Układ BMP390L to czujnik ciśnienia barometrycznego, nadający się do wymagających zastosowań przemysłowych i IoT (logistyka, sprzęt AGD, precyzyjne maszyny rolnicze, roboty, drony). Zapewnia bardzo dobrą stabilność temperaturową, wynoszącą typowo ±0,6 Pa/K i błąd pomiaru na poziomie ±0,03 hPa, mniejszy niż w przypadku innych porównywalnych czujników dostępnych obecnie na rynku. BMP390L może być stosowany m.in. do pomiaru poziomu wody i śledzenia zasobów oraz w nawigacji.

https://bit.ly/32AMrz5

Oscylator 32,768 kHz o dokładności ±5 ppm w przemysłowym zakresie temperatury pracy

TM-2220-C7 to wysokostabilny oscylator 32,768 kHz z kompensacją temperaturową, zamykany w hermetycznej obudowie DFN o wymiarach 3,2×1,5×0,8 mm. Charakteryzuje się on małym poborem prądu, nieprzekraczającym 1,5 μA. Zawiera układ kompensacji termicznej, pozwalający uzyskać stabilność równą ±5 ppm w przemysłowym zakresie temperatury pracy.

TM-2220-C7 pracuje z napięciem zasilania z zakresu od 1,1 do 3,63 V. Zawiera wyjście CMOS. Uzyskał kwalifikację AEC-Q200. Może znaleźć zastosowanie wszędzie tam, gdzie najważniejszymi wymogami są niski koszt i małe wymiary podzespołów. Nadaje się idealnie do asynchronicznych generatorów sygnału zegarowego stosowanych w miniaturowych urządzeniach medycznych, IoT i pomiarowych oraz w elektronice samochodowej.

https://bit.ly/2Iq9Fjd

Monolityczny wzmacniacz mocy GaN na pasmo 2...4 GHz o mocy wyjściowej 150 W

Najnowszy monolityczny wzmacniacz mocy w.cz. QPA3070 firmy Qorvo został zaprojektowany do zastosowań w komercyjnych i wojskowych radarach pracujących w paśmie S (2…4 GHz). Jako pierwszy tego typu układ dostępny obecnie w sprzedaży pozwala uzyskać moc wyjściową 150 W w zakresie częstotliwości od 2,9 do 3,5 GHz, większą o 50% od wcześniejszych wersji. Wzmocnienie mocy tego układu wynosi 28 dB, a sprawność 58% (PAE). Parametry te uzyskano dzięki zastosowaniu opracowanego przez Qorvo procesu produkcyjnego GaN-on-SiC o małych stratach i dużej gęstości mocy. Wzmacniacz QPA3070 jest zamykany w obudowie SMD o wymiarach 7×7×0,85 mm. Poza doskonałymi parametrami elektrycznymi, charakteryzuje się też dużą niezawodnością. Wszystkie egzemplarze przechodzą pełny test parametrów elektrycznych DC i w.cz. na etapie produkcji.

https://bit.ly/2SUXhtL

Sprzęgacze optyczne o izolacji 5 kV

Wurth Elektronik po raz pierwszy wprowadza do oferty sprzęgacze optyczne z wyjściem fototranzystorowym. Nowa seria WL-OCPT 816 obejmuje sprzęgacze koplanarne, zawierające stopień wejściowy z diodą IR LED i stopień wyjściowy z fototranzystorem. Układy te charakteryzują się napięciem izolacji 5 kV oraz stabilnym współczynnikiem CTR w całym zakresie temperatury pracy od –55 do +110°C. Są zamykane w 5 typach obudów DIP-4 z wyprowadzeniami do montażu THT i SMT. Całość oferty obejmuje 25 typów sprzęgaczy o 5 różnych współczynnikach CTR z zakresu od 50% do 600%. Są one polecane do zastosowań w zasilaczach/ładowarkach, systemach mikroprocesorowych, miernikach energii elektrycznej i innych układach wymagających zapewnienia izolacji galwanicznej. Pracują z maksymalnym napięciem kolektor-emiter wynoszącym 80 V i z maksymalnym prądem wyjściowym 50 mA.

http://bit.ly/38pwtYH

eprasa.pl 85168ce91e

koktajl niusów

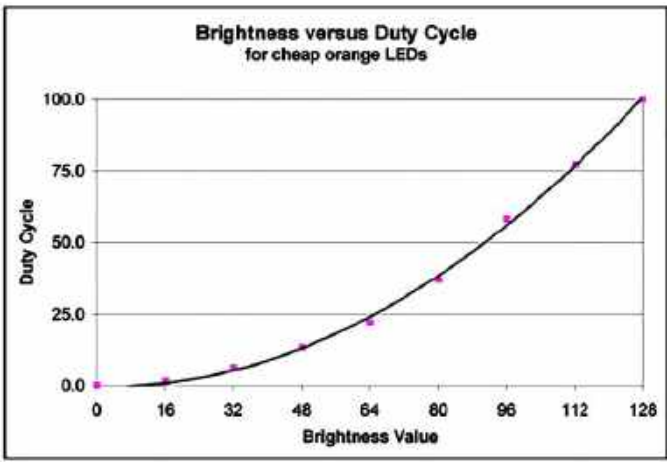
Krótka historia pasma częstotliwości radiowych z zakresu 87,5...108 MHz

Pierwsze ustalenia, dotyczące pasma radiowego z zakresu 87,5...108 MHz, przypadają na 1961 rok, kiedy Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny (ITU – International Telecommunication Union) zorganizował Europejską konferencję nadawczą w zakresie pasm VHF i UHF (The European Broadcasting Conference in the VHF and UHF bands) obradującą między 26 maja a 22 czerwca w Sztokholmie. W trakcie konferencji ustanowiono m.in. pasmo Band II o zakresie częstotliwości 87,5...100 MHz obowiązujące tylko dla Europy (https://bit.ly/3o33ouo). Dwa lata później, w ramach Afrykańskiej konferencji nadawczej w zakresie pasm VHF i UHF (African VHF/UHF Broad-casting Conference) w dniach 29 kwietnia, 3 maja w Genewie, poszerzono zasięg terytorialny pasma włączając Afrykę (https://bit.ly/2T29U6c). Taki stan rzeczy utrzymał się do 1979 roku, kiedy obradowała, w dniach 24 września, 6 grudnia w Genewie, Światowa Administracyjna Konferencja Radiokomunikacyjna (World Administrative Radio Conference 1979, w skrócie: WARC 79) (https://bit.ly/3dBTfjm). Na jej mocy ustanowiono dodatkowe pasmo o częstotliwościach z zakresu 100...108 MHz dla Regionu Pierwszego ITU pokazanego na rysunku. W ten sposób dzisiejsze pasmo zaistniało jako dwa odrębne.

Ostatecznie, na mocy Regionalnej Konferencji Administracyjnej emisji nadawczej dźwięku w standardzie FM w paśmie VHF dla Regionu 1 i wybranych krajów Regionu 3 (Regional Administrative Conference for FM Sound Broadcasting in the VHF band (Region 1 and certain countries concerned in Region 3), która odbyła się w dwóch sesjach w Genewie: pierwszej w dniach 23 sierpnia, 17 września 1982 roku (https://bit.ly/3lXrHrB) i drugiej w dniach 29 listopada, 7 grudnia 1984 roku (https://bit.ly/3k9Mo3h), pasma zostały połączone. Tak jest do dzisiaj, w tym parametry emisji, które również ustanowiono w ramach tej konferencji. Dodajmy, że pasmo to zaczęło obowiązywać w Polsce w pełni od 1 stycznia 2000 roku, na mocy Rozporządzenia Ministra Łączności z dnia 8 października 1997 roku zmieniającego rozporządzenie w sprawie przeznaczeń częstotliwości i zakresów częstotliwości na obszarze Rzeczypospolitej Polskiej oraz warunków ich wykorzystania (Dz.U. 1997 nr 128 poz. 836), dostępnego pod adresem: https://bit.ly/3lRLVD4. Oczywiście wcześniej ono już u nas obowiązywało, lecz równolegle z pasmem OIRT, i dopiero od 1995 roku.

Współczynnik wypełnienia przebiegu PWM a jasność diody LED

Zależność między wskazanymi w tytule wielkościami pokazuje rysunek (przykład dla diody LED świecącej w kolorze pomarańczowym). Jak widać, jest to zależność wykładnicza, a dokładniej: doskonale znana adeptom elektroniki, charakterystyka prądowo-napięciowa



diody półprzewodnikowej (którą jest też dioda LED). Wyjaśnienie przebiegu charakterystyki jest proste: jasność diody LED jest proporcjonalna do jej prądu przewodzenia I_F, tzn. oba parametry są powiązane w sposób niemal liniowy. Skoro tak, to na mocy przytoczonej charakterystyki, pierwsze również zależy niemal wykładniczo od jej napięcia przewodzenia V_F. Matematycznie to jej liniowe skalowanie w osi OY, niezmieniające jednak jej kształtu. Gdy uwzględnimy przy tym idealnie liniową zależność napięcia średniego przebiegu PWM, od jego współczynnika wypełnienia, otrzymamy relację taką, jak na rysunku. Wszystko to jest zgodne z obserwacjami.

Recommended RAM	Operating System
16 MB	Windows 95
32 MB	Windows 98
32 MB	Windows 98SE
32 MB	Windows ME
32 MB	Windows NT 4.0 WS
64 MB	Windows 2000 Pro
128 MB	Windows XP Home
128 MB	Windows XP Pro
256-512 MB	Windows Server 2003

O starych Windowsach

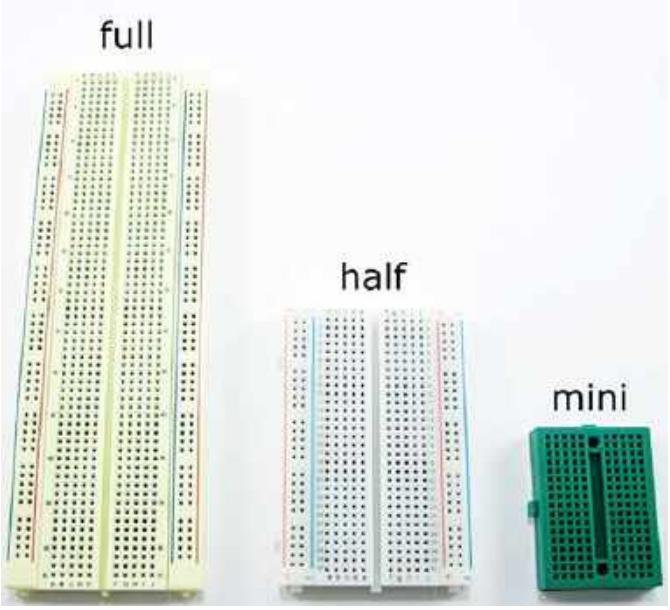
Na rysunku pokazano absolutnie minimalne wartości pamięci RAM potrzebne do poprawnego działania dziewięciu wybranych wersji systemów operacyjnych Windows. Jak widać, najmniejszą odznacza się Windows 95, a największą Windows Server 2003. Łatwo to wytłumaczyć możliwościami sprzętu dostępnego w czasie premiery systemów. Bardziej interesujący jest przyrost wykładniczy o podstawie 2 wspomnianej wielkości wraz z następnymi wersjami. Przyrost, który zdaje się podtrzymany. Windows Vista wymaga co najmniej 1 GB pamięci RAM, a Windows 7, 8 i 10 od 1 do 2 GB.

Standardy płytek stykowych

Rysunek pokazuje trzy najczęściej spotykane standardy z rastrem (tj. rozstawem otworów stykowymi) 0,1 cala, czyli 2,54 mm. Są to:

- full (full-size) – o wymiarach 6,5×2,2×0,3 cala (w zaokrągleniu 165×56×8 mm), z 830 otworami stykowymi;

eprasa.pl 85168ce91e



- half (half-size) – o wymiarach 2,2×3,3×0,3 cala (w zaokrągleniu 85×55×8 mm), z 400 otworami stykowymi;
- mini (mini-size) – o wymiarach 1,8×1,4×0,3 cala (w zaokrągleniu 46×36×8 mm), ze 170 otworami stykowymi.

Podane wymiary to kolejno: długość, szerokość i grubość. Ponadto przy konwersji na system metryczny przyjęto relację: 0,1 cala = 2,54 mm. Jako otwory stykowe należy rozumieć angielski termin *tie-point*, czyli punkt łączący z szyną płytki. Dodatkowo dwa pierwsze standardy zawierają dwa odrębne rzędy przeznaczone na obwód zasilania.

Podane wymiary mogą się nieznacznie różnić, ponieważ nie są to oficjale ustalenia i nic nie zobowiązuje producentów płytek stykowych do ich ścisłego przestrzegania. Są jeszcze większe standardy płytek stykowych. Jakie? Pozostawiamy Wam to do odnalezienia.

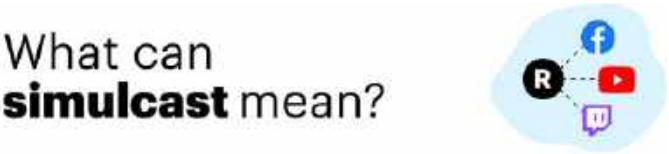
Przekątna ekranu determinantą sprzętu przenośnego

Rysunek prezentuje podział smartfonów, fabletów i tabletów, jasno zaznaczając, że pierwsze charakteryzują się ekranami o przekątnej do 5 cali włącznie, drugie między 5 a 7 cali, a trzecie od 7 cali wzwyż. Funkcjonalność nie jest istotna, teraz wszystkie te urządzenia potrafią tyle samo, a nawet mają podobne systemy operacyjne (Android). Tak wygląda obecna sytuacja, nie wiadomo, o co producenci zaczną wzbogacać swoje produkty w przyszłości, aby je wyróżnić na tle innych.

Szczególną uwagę warto zwrócić na fablety, które są hybrydami smartfona i małego tabletu. Świadomość istnienia tego typu urządzeń jest mała, i wręcz zanika. Jest to tylko rozwiązanie pośrednie, a te zwykle pozostają poza głównym zainteresowaniem. Poza tym, konsumenci wolą kupić coś bardziej standardowego, co już znają, aniżeli coś, co sprawia wrażenie eksperymentu, coś co może i jest nowe, ale jest za to dziwne i niepewne. Dlatego fablety często są określane jako smartfony, co zaciera ich właściwą klasyfikację.

Wszystko ma swoją porę – nawet sprzęt elektroniczny

Ale nie chodzi o jego przedwczesne uśmiercanie, a wręcz przeciwnie, chodzi o jego rozwój. Dobrze widać to w przypadku laptopów i telefonów komórkowych. Na rysunku widać, że trzeba było 25 lat ewolucji dla laptopów oraz 40 lat dla telefonów komórkowych, aby dojść do obecnego poziomu. Nie ma co się dziwić – laptopy pojawiły się w okresie, gdy rozwój elektroniki był już mocno zaawansowany, a ponadto ich rozwój uwarunkowany był przede wszystkim zmianami w podzespołach. Sytuacja wygląda inaczej w przypadku telefonów komórkowych, które pojawiły się wcześniej niż laptopy, a więc w czasie, kiedy rozwój elektroniki dopiero się zaczynał. Co więcej, wiele lat zajęła budowa odpowiedniej infrastruktury, od której rozpoczęła się właściwa ich ewolucja. Wreszcie sami operatorzy również potrzebowali sporo czasu, by dostosować oferowane usługi. I jeszcze czas na wdrożenie wielu obecnie stosowanych standardów przez producentów telefonów. Telefon komórkowy okazał się po prostu bardziej wymagający od laptopa.



Simulcast – co to takiego?

Jest to skrót angielskiego terminu *simultaneous broadcast* – transmisja jednoczesna, transmisja w tym samym czasie. Jego tłumaczeń jest co niemiara, więc nie zaprzątajmy sobie tym już dłużej głowy. Bardziej istotne jest znaczenie, a są dwa:

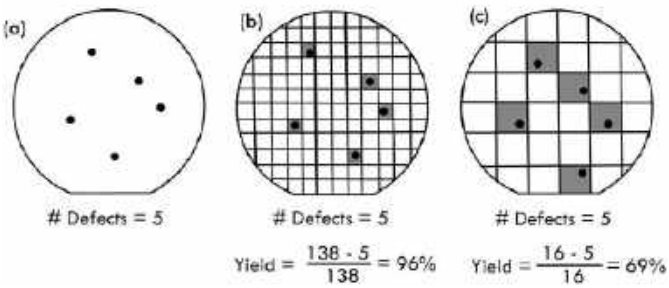
- ciągła emisja tego samego programu/stacji/przekazu w oparciu na przynajmniej dwóch różnych formach mediów (I),
- ciągła emisja tego samego programu/stacji/przekazu na bazie przynajmniej dwóch różnych form usług w obrębie tego samego medium (II).

eprasa.pl 85168ce91e

Typowym przykładem wariantu I są kanały Telewizji Polskiej, które są nadawane w standardach cyfrowych DVB-T, DVB-S i DVB-C oraz analogowo w sieciach kablowych. Czy Czwórka Polskiego Radia, nadająca jeszcze parę lat temu dźwięk w standardzie FM, oraz dźwięk i obraz przez Internet i w wybranych sieciach kablowych. Nie mówiąc o pokrywającym swym zasięgiem północno-zachodnie Mazowsze i Warszawę Radiu 7, które jest dostępne zarówno jako stacja w standardzie FM, jak i stacja standardu DAB+. Z kolei w przypadku wariantu II przykładem są multistreamy w Internecie, tj. ten sam przekaz na żywo nadawany różnymi portalami, np. przez YouTube i Facebook. Czy dana stacja radiowa dostępna w różnych stacjach kablowych, np. w standardzie FM. Lub też kanał telewizyjny dostępny pod konkretnym adresem IP w Internecie, do którego dostęp jest przez wielu niezależnych operatorów internetowych (providerów).

Ile diod LED mieści się na powierzchni 1 cm²?

Jedną z propozycji odpowiedzi pokazuje rysunek. Wszystko zależy od technologii ich wykonania. Dla diody typu DIP o średnicy 3 mm odpowiedź wynosi 9 (dla 5 mm wynik zmniejsza się do 4, natomiast dla 10 mm tylko do 1). Analogicznie należy postąpić dla reszty technologii, a nawet polecamy sprawdzić to w praktyce (o ile mamy takie możliwości). W przeciwnym razie pozostaje uwierzyć.

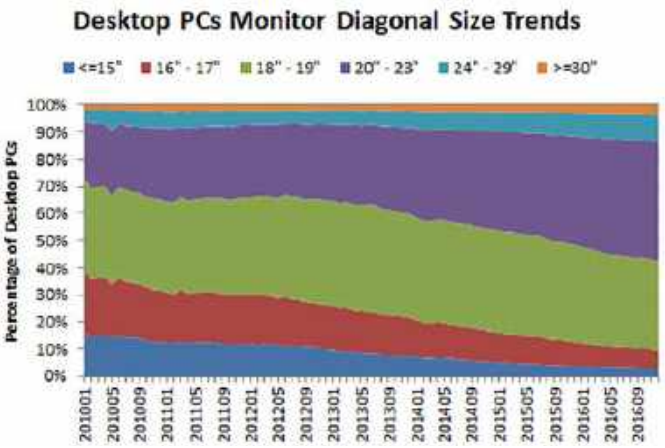


Ważny parametr wafla krzemowego

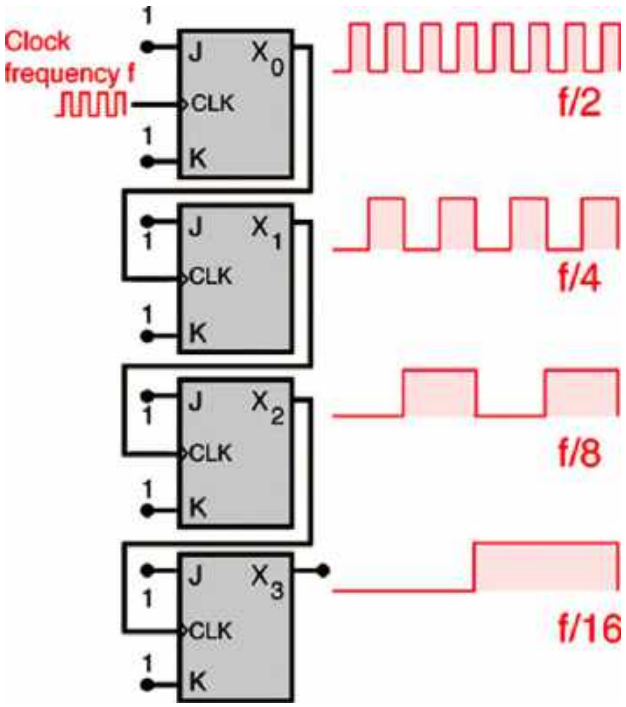
Jest to jego tzw. uzysk, czyli *yield*, będący stosunkiem różnicy liczby wszystkich układów scalonych na waflu i liczby układów na nim uszkodzonych (z chociaż jednym, najdrobniejszym defektem, który powoduje ich nieprawidłową pracę) do pierwszego składnika tej różnicy. Im większy uzysk, tym lepsza jest produkcja wspomnianych układów (zwyczajowo *foundry*). Wyraża się go w procentach i chciałoby się, aby zawsze wynosił 100% (co jednak nie jest w praktyce możliwe). Przykład obliczeniowy został pokazany na rysunku. Warto go odnieść do partii zawierającej określoną liczbę wafli krzemowych (*lot*), wtedy będzie widać, jakie to jest ważne. Dużo niesprawnych układów to duże straty oraz utracona renoma w oczach producentów, którzy zlecają produkcję swoich wyrobów w takiej fabryce.

Przekątne monitorów komputerów PC

Na rysunku pokazano udział monitorów o określonych rozmiarach w latach 2010–2016. Nie uwzględniamy przy tym technologii ich wykonania. Wyniki nie są zaskakujące – coraz większy postęp przy coraz niższych cenach lepszych monitorów powodował ich dużą sprzedaż



i wynikający z tego większy procent ich udziału. Jednak nie chodzi tylko o cenę, ale również o tzw. efekt większości – jeśli mają wszyscy znajomi, to będę miał i ja. W końcu każdy rynek kiedyś się nasyca i potem trudno zmienić taką sytuację. Trzeba zmiany konsumentów, ich nawyków i pragnień.



Co oznacza dzielenie przez 2 w technice cyfrowej

Preskalery, czyli dzielniki częstotliwości, często realizowane są jako łańcuchy zazębionych ze sobą liczników binarnych mod 2^n. Są one fizyczną, sprzętową reprezentacją dobrze znanej w matematyce funkcji odwrotnie wykładniczej o podstawie równej 2 i ujemnym wykładniku z liczbami naturalnymi bez zera. Co prawda nie wykonujemy tu operacji bezpośrednio na liczbach, ale za to modyfikujemy częstotliwość przebiegu zegarowego zgodnie ze wspomnianą funkcją. Oczywiście wariantów licznika jest dużo, na rysunku prezentujemy najprostszy z nich.

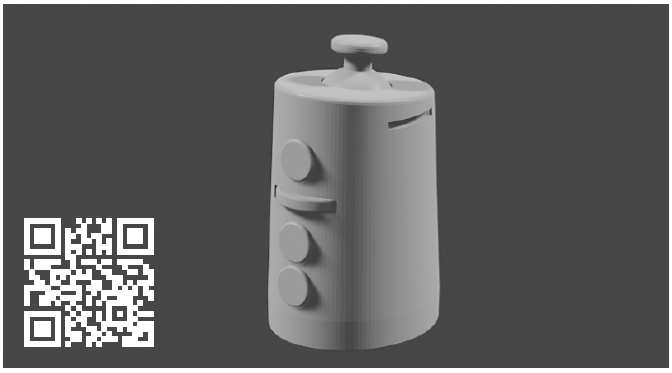
Jakub Tyburski
jakub.tyburski@wat.edu.pl

http://forum.ep.com.pl

eprasa.pl 85168ce91e

dodaj do obserwowanych

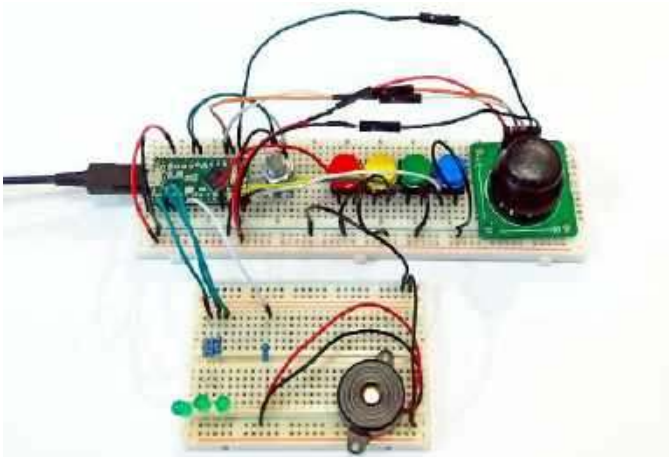
Przedstawiamy redakcyjny wybór najciekawszych projektów spośród ostatnio anonsowanych w internecie. Są to projekty na różnych etapach realizacji. Warto się zapoznać z projektami zakończonymi i śledzić realizację projektów niegotowych, by czerpać z nich inspirację do własnych prac.



Przenośny, oburęczny manipulator do komputera

Mysz komputerowa to wszechobecne urządzenie wskazujące. Jednak standardowy kształt i sposób działania myszy nie zawsze są praktyczne we wszystkich sytuacjach i nie zawsze nadają się do wykorzystania przez wszystkich, szczególnie osoby, które mają trudności z motoryką. Mysz wymaga również odpowiedniej powierzchni do działania z wystarczającym obszarem roboczym. Z kolei touchpady mogą być nadmiernie wrażliwe na przypadkowe, niezamierzone dotknięcia, a dokładne szybkie pozycjonowanie przy ich użyciu może być trudne. Jednak istnieją alternatywne manipulatory do komputera i jeden z nich jest przedmiotem tego projektu.

Mysz z wbudowanym joystickiem nie jest nową koncepcją, ale można ją udoskonalić, aby była poręcznym i przenośnym urządzeniem wskazującym, działającym niezależnie od powierzchni. Można ją także precyzyjnie dostrajać i programować, aby dopasować ją do potrzeb każdego użytkownika. Urządzenie jest trzymane (lub przypinane) do dłoni, z joystickiem umieszczonym pod kciukiem i przyciskami oraz kółkiem przewijania pod palcami. Zostało zaprojektowane tak, aby było symetryczne, dzięki czemu można je wygodnie trzymać tak w prawej, jak i lewej dłoni.



Sercem urządzenia jest moduł TeensyLC z prawie wszystkimi innymi elementami podłączonymi do niego. Znajdujący się obok enkoder obrotowy pełni funkcję kółka przewijania. Moduł joysticka można również kliknąć jak przycisk, więc urządzenie ma jeszcze jeden przycisk do mapowania. Zamontowany brzęczyk zapewnia programowalne, dźwiękowe sprzężenie zwrotne, informujące użytkownika o zdarzeniach. Możliwe jest także wyzwalanie modułu wibracyjnego dla zapewnia podstawowego sprzężenia haptycznego. Wszystkie przyciski, kółko przewijania i ruchy osi joysticka są w pełni programowalne, dzięki czemu można dostosować mysz do własnych preferencji czy możliwości. Szybkość ruchu kursora również można konfigurować tak, aby była proporcjonalna do przesunięcia osi od środka. Ustawienia mogą być zapisywane w postaci presetów.

System zawiera wizualny wskaźnik, pokazujący, który preset został wybrany. TeensyLC ma tylko 128 bajtów emulowanej pamięci EEPROM, więc zapisać można jedynie trzy presety, co jest wskazywane za pomocą trzech diod LED. Urządzenie można skonfigurować tak, aby diody te wyłączały się lub migały jako wizualny mechanizm sprzężenia zwrotnego.

Sprzęt został przetestowany w systemie Linux, Windows 10 i MacOS.

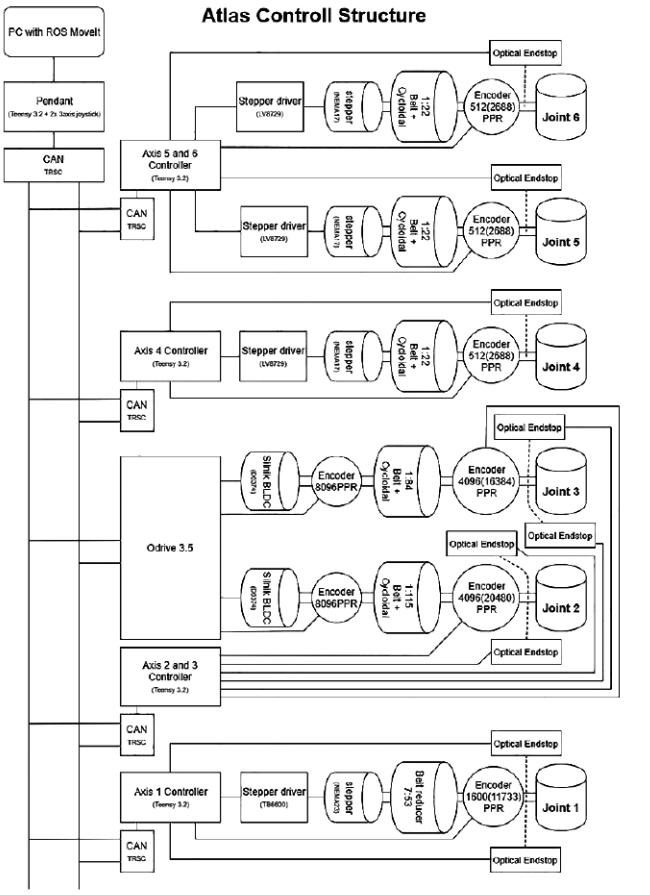
https://bit.ly/3mpt0zE

Uniwersalny, drukowany w 3D robot z sześcioma stopniami swobody

Jest to ramię robota z sześcioma stopniami swobody (6DOF) w pełni wykonane w technologii druku 3D. Nie jest pierwszym podejściem autora do takiej konstrukcji – to w zasadzie jego czwarty robot tego rodzaju. Na czas pisania tego tekstu autor wydrukował już wszystkie elementy mechaniczne i złożył system. Uruchomiona jest również elektronika, ale nadal trwają prace nad softem. Docelowo system ma wspierać ROS (*Robot Operating System*) i Moveit. Dzięki temu możliwa będzie integracja w szerszym systemie.

Robot zawiera osiem enkoderów, dwa serwa BLDC (*Odrive*) i cztery silniki krokowe. Docelowo system ma mieć powtarzalność poniżej 0,5 mm bez zmiany obciążenia i poniżej 2 mm ze zmianą obciążenia. Maksymalna nośność robota wynosi 4,5 kg, a 2,5 kg to udźwig nominalny. Maksymalne

eprasa.pl 85168ce91e



obciążenie ograniczone jest „nadgarstkiem" robota, Przy samych pierwszych trzech osiach udało się unieść 9,5 kg. Wszystkie osie mogą pracować z prędkością do 15 obrotów na minutę lub więcej. Zasięg ramienia to 500 mm. Robot ma być bardzo wszechstronny. Istnieje możliwość wymiany końcowych efektorów. Cały system sterowany jest poprzez interfejs CAN.

Oś pierwsza to obrót podstawy, druga to przegub nad podstawą etc. Do sterowania osiami służy pięć modułów Teensy 3.2. Są one połączone w jedną sieć CAN (na tej samej magistrali jest też moduł Odrive). Dzięki temu przez całość robota przechodzi tylko 5 kabli – masa, zasilanie 48 V, zasilanie 12 V i dwie linie CAN (CANH i CANL). Osią pierwszą porusza silnik krokowy NEMA23 z enkoderem i przekładnią pasową. Oś druga wyposażona jest w napęd Odrive z silnikiem BLDC i dwustopniową redukcję. Podobnie skonstruowana jest trzecia oś. Druga i trzecia oś mają po dwa enkodery – jeden bezpośrednio na wale, a drugi na przegubie napędzanym przez specjalny pasek (taki, który nie ma obciążenia na nim i jest używany tylko do przekazywania obrotów z wyjścia reduktora do enkodera – zwiększa to precyzję w porównaniu do paska, który byłby współdzielony między enkoderem i silnikiem). Enkodery na odpowiednich przegubach kontrolowane są przez moduł Teensy 3.2, który wysyła do Odrive komendy poprzez sieć CAN. Osie 4., 5., 6. – wyposażone są w silniki krokowe NEMA17, również z 2-stopniową redukcją. Pierwszy stopień to przekładnia pasowa o regulowanym przełożeniu, a druga to przekładnia cykloidalna. Każda z tych osi ma własny enkoder, napędzany odpowiednim paskiem z wyjścia przekładni cykloidalnej.

Robotem można sterować za pomocą kontrolera, również wyposażonego w moduł Teensy. Ma on dwa joysticki o trzech osiach swobody, co umożliwia sterowanie wszystkimi osiami. Kontroler ten podłączony może być również do komputera, co umożliwia bardziej zaawansowane sterowanie.

http://bit.ly/331XSMP

ResQ – system do lokalizacji osób w trakcie misji ratunkowych

Jest to otwarty projekt – sniffer pakietów typu beacon, przeznaczony do lokalizowania ludzi, takich jak zagubieni na szlaku wędrowcy, obozowicze czy nawet kłusownicy w rezerwatach. Działa niemalże wszędzie, o ile telefon lokalizowanej osoby ma włączone Wi-Fi. Sprzęt wykrywa ramki beacona pochodzące z telefonu komórkowego, rejestruje ich współrzędne GPS, dane, a nawet wykonuje zdjęcia. Wykonane są 3 rodzaje modułu: przenośny ręczny i do montażu na statku powietrznym (samolot lub dron) oraz stacjonarny „wartownik". Istnieje również moduł kamery kompatybilny ze wszystkimi trzema rodzajami systemów.

System składa się z czterech różnych modułów:

- ResQ Air – moduł do wykorzystania w samolocie lub dronie. Służy do automatycznej detekcji obecności człowieka. Monitoruje obecność transmisji bezprzewodowych, a po ich wykryciu zapisuje lokalizację GPS i siłę sygnału na karcie SD oraz przesyła dane – lokalnie poprzez Bluetooth lub na większy zasięg z wykorzystaniem LoRa;
- ResQ Ground – moduł podobny do powyższego, jednakże do pracy na ziemi. Ma zintegrowaną antenę kierunkową oraz własne zasilanie. Pozwala to zespołom poszukiwawczym na ziemi na dokładne namierzenie źródła sygnału;
- ResQ Cam – moduł z kamerą przeznaczony do wizualizacji obszaru poszukiwań. Ten niedrogi moduł oparty na ESP32 robi zdjęcia i zapisuje je na karcie SD za każdym razem, gdy wykryje aktywność bezprzewodową. Dzięki temu możliwy jest podgląd miejsc, gdzie znajdują się poszukiwane osoby;
- ResQ Sentry – moduł składa się z połączonych modułów Air lub Ground oraz modułu Cam i przeznaczony jest do ochrony terenów, szczególnie takich jak parki narodowe itp.

https://bit.ly/31HmAEt

„Owijany" Pentium – komputer x86 DIY

Oryginalny procesor Intel 80501 Pentium na Socket 4 był ostatnim dużym układem z rastrem 0,1" i zasilaniem 5 V. Jest to teoretyczna górna granica tego, co można wykorzystać za pomocą standardowego

eprasa.pl 85168ce91e

zestawu narzędzi dostępnych w domu dla amatora: płytki prototypowej, połączeń owijanych i logiki 5 V.

Wczesne 8-bitowe mikroprocesory z układami serii 74 i labiryntami drutu na płytkach prototypowych to łatwy i przyjemny sposób na rozpoczęcie budowy komputerów wdomu. Przejście do ery 16-bitowej jest z pewnością bardziej skomplikowane, ale nadal można to osiągnąć za pomocą części DIP na płytkach prototypowych. Pójście dalej, w początki ery 32-bitowej, jest wyzwaniem, z częściami w obudowach PGA i PLCC, znacznie bardziej złożonymi wymaganiami dla logiki integrującej wszystkie elementy i bardziej rygorystycznymi kwestiami zależności czasowych. Płytki prototypowe bez lutowania nie nadają się do tego zastosowania, ale wykorzystać można połączenia owijane punkt-punkt.

Celem opisanego projektu jest doprowadzenie tych procesów budowania do skrajnych, być może nawet absurdalnych, granic. Pierwsza wersja procesora Intel Pentium wymagała pojedynczego zasilacza 5 V i była montowana w 273-stykowym gnieździe PGA z odstępem między stykami 0,1 cala (2,54 mm) – Socket 4. Późniejsze procesory Pentium zasilane są już 3,3 V i mają inaczej rozłożone piny. Od czasu premiery Pentium 2 chipsety były dostarczane wyłącznie w obudowach BGA, wrogich hobbystom. Konkurent Pentium z tamtych czasów, PowerPC 601, został wypuszczony na rynek z napięciem zasilania 3,6 V i w obudowie QFP. Intel 80501 Pentium jest ostatnim „dużym" mikroprocesorem, który może być używany w komputerze DIY bez konieczności zamawiania płytek drukowanych dla całego projektu. Z pewnością nie jest to jednak łatwe.

Przy maksymalnej prędkości taktowania 66 MHz Pentium pobiera ponad 3 A przy 5 V. Wymaga starannego rozważenia zasilania i prowadzenia go w systemie, a także aktywnego chłodzenia. Układ ten miał również 64-bitową magistralę danych, mimo że był procesorem 32-bitowym i wymagał zwrócenia całej 64-bitowej szerokości na żądanie. Przejście od swobodnego uruchamiania do pierwszego kodu będzie wymagało wielu chipów ROM lub dodatkowej logiki do odczytu i przechowywania wielu bajtów z pamięci ROM (w celu przedstawienia procesorowi pełnego 64-bitowego poczwórnego słowa).

Systemowa pamięć RAM również musi być 64-bitowa. Wczesne płyty główne Pentium wymagały, aby 72-pinowe moduły SIMM były instalowane parami, aby spełnić ten wymóg. Późniejsze płyty główne Pentium oferowały opcje dla 168-pinowych modułów DIMM o szerokości 64-bit. Zarówno 72-stykowe moduły SIMM, jak i 168-stykowe moduły DIMM nie pasują do płytek prototypowych z rastrem 2,54 mm. Jedyną opcją kompatybilną z takimi płytkami są 30-pinowe moduły SIMM, ale muszą być one instalowane po osiem sztuk.

Typowe chipsety dla systemów z procesorem Pentium produkowane są w obudowach QFP i wymagają adapterów do płytki uniwersalnej. W przypadku prostszych systemów możliwe jest zbudowanie niestandardowej logiki łączącej z większych układów CPLD zamontowanych w podstawkach PLCC.

Ostatnim wyzwaniem jest częstotliwość zegara. Pentium 80501 był produkowany z dwoma prędkościami znamionowymi – 60 MHz i 66 MHz. Znamionowa minimalna częstotliwości taktowania stanowi połowę prędkości znamionowej i może być znacznie łatwiejsza do osiągnięcia na płytce prototypowej, jednakże nawet częstotliwość 30 MHz może być problematyczna na płytce prototypowej z owijanymi połączeniami. „Budowanie komputera DIY z procesorem Pentium przy użyciu konstrukcji owijanej to doprowadzone do absurdu budowy komputerów DIY. Biorąc pod uwagę złożoność, nie spodziewam się, że uda mi się zbudować coś, co będzie w stanie obsługiwać systemy operacyjne odpowiednie dla tego okresu, takie jak DOS czy Windows 3.1", pisze autor konstrukcji. „Dojście do momentu uruchomienia dowolnego kodu będzie niesamowitym wyzwaniem, ale spodziewam się, że po drodze będę mógł się wiele nauczyć", podsumowuje.

https://bit.ly/2HvsTUe

Cyberdeck – zintegrowany, mobilny system do rozpoznania elektromagnetycznego

Oparty na Raspberry Pi z modułami SDR (radio definiowane programowo) jest przeznaczony do prowadzenia w terenie rozpoznania elektromagnetycznego. Różni się od innych konstrukcji tego typu, ponieważ opiera się na świadomości sytuacyjnej połączonej z analizą pasma radiowego w szerokim zakresie. Ten zintegrowany zestaw narzędzi jest przeznaczony do:

- monitoringu krótkofalarstwa,
- nadzoru widma,
- pracy jako odbiornik radiowy w dowolnym miejscu i z dowolną transmisją,
- śledzenia i określania odległości od balonów pogodowych,
- identyfikacji sygnałów wyśledzonych w eterze,
- szybkiego uruchamiania stacji mobilnego śledzenia,
- przenośnego monitoringu ruchu lotniczego,
- monitorowanie ruchu morskiego,
- pracy jako zdalny odbiornik danych,
- śledzenia zasobów w logistce,
- pracy jako odbiornik faksu/telefaksu z danymi meteorologicznymi,
- szpiegostwa w zakresie rozpoznania sygnałów RF.

Wiele tego rodzaju urządzeń mieści się w obudowie Peli 1300, ten system idzie o krok dalej i integruje wszystko w superkompaktowej obudowie Peli 1200. To obudowa wielkości pudełka na buty. Z łatwością zmieści się do plecaka.

System wykorzystuje oficjalny ekran dotykowy Raspberry Pi 7" oraz wbudowany powerbank do zasilania. Możliwe jest też zasilanie zewnętrzne (od 9 do 36 V), które służy również do ładowania baterii wewnętrznej.

https://bit.ly/3otsMJZ

Mabel – robot DIY inspirowany konstrukcjami Boston Dynamics

MABEL to samobalansujący robot, którego konstrukcja jest w pełni otwarta. Zainspirowany został słynnym robotem firmy Boston Dynamics. Robot jest sterowany za pomocą modułu Arduino, który obsługuje wszystkie obliczenia PID (oparte na oprogramowaniu YABR typu open source) na bazie kąta otrzymanego z akcelerometru/żyroskopu MPU-6050. Raspberry Pi z kolei zarządza komunikacją poprzez Bluetooth i sterowaniem serwomechanizmem, wykonując algorytmy kinematyki odwrotnej algorytm do perfekcyjnego przesuwania nóg robota w dwóch osiach.

eprasa.pl 85168ce91e

Celem projektu MABEL jest stworzenie niedrogiej platformy dla dwunożnego robota balansującego, którą można budować na skalę hobbystyczną przy użyciu tanich części. MABEL będzie w stanie aktywnie balansować w wielu osiach i zmieniać długość nóg w zależności od otoczenia, aby zwiększyć swoje możliwości w terenie.

MABEL różni się od innych robotów balansujących tym, że jego nogi mogą się poruszać, a robot nie musi poruszać się w ustalonej pozycji. Tutaj do gry wchodzą Raspberry Pi i kontroler serwomechanizmu. Algorytmy kinetyki odwrotnej napisane są w Pythonie. Skrypt pobiera współrzędne (X, Y) i działa wstecz, aby obliczyć kąt każdego pojedynczego przegubu robota wymagany do precyzyjnego przemieszczenia się do zadanego położenia.

https://bit.ly/31JNCLf

Elektroniczny wskaźnik statystyk do gier RPG

Stat Tracker to przenośne urządzenie zasilane bateryjnie, które śledzi stan zdrowia, energię etc. w grze RPG Hyper Light Drifter. Chociaż został zaprojektowany z myślą o tym konkretnym systemie RPG, to może być używany w innych papierowych grach RPG, takich jak Dungeons and Dragons itp.

Funkcje urządzenia:

- śledzi do 40 punktów zdrowia i energii oraz 10 dodatkowych punktów;
- jasne diody RGB dla każdej ikonki;
- niestandardowa grafika w motywie hyper light drifter;
- unikalna konstrukcja typu sandwich z płytek drukowanych i ze specjalnymi dyfuzorami dla LED;
- dolna obudowa wykonana w technologii druku 3D;
- sześć fizycznych przycisków na płytce drukowanej do dodawania i odejmowania punktów;
- dwa przyciski dotykowe do regulacji jasności diod LED;
- konfigurowalne palety kolorów, w tym tryby dla daltonistów;

- złącze microUSB do ładowania;
- do 8 godzin pracy na baterii przy domyślnej jasności i ikonie wskaźnika naładowania baterii;
- statystyki są zapisywane po wyłączeniu.

Konstrukcję wykonano z trzech płytek drukowanych złożonych w jedną całość. Górna warstwa pełni funkcję obudowy, a cała elektronika znajduje się na dolnej płytce. Na niej znajduje się także bateria i złącze microUSB służące do ładowania. Autor projektu prowadzi obecnie kampanię crowdfundingową, gdzie będzie można zakupić tego rodzaju urządzenie.

https://bit.ly/3mnpFRI
https://bit.ly/3mj86T1

ARMAWATCH i ARMACHAT – system do komunikacji dalekiego zasięgu

Zaprezentowane komunikatory to bardzo proste i niedrogie urządzenia. Zaprojektowane są jako system komunikacji awaryjnej na wypadek katastrof naturalnych itp. Działają bez konieczności wykorzystywania jakiejkolwiek infrastruktury – jako bardzo zaawansowane walkie-talkie.

Autor zastosował w nich tylko jeden, łatwy do lutowania mikrokontroler – SAMD21E18 w obudowie TQFP32 (taki sam rozmiar jak popularna ATmega328). Układ ten ma wiele możliwości, które odróżniają go od wspomnianego układu AVR, między innymi zintegrowany interfejs USB, niewymagający oscylatora kwarcowego, bootloader USB, 256 kB pamięci Flash i 32 kB pamięci RAM. Ma także interfejsy takie jak SPI, UART czy I²C.

Do montażu urządzenia nie są wymagane żadne specjalne narzędzia, wszystko jest wykonane w zwykłej technologii PCB. Panel przedni ma podświetlenie LED dla klawiatury, ale pełni też funkcję mechanicznej obudowy.

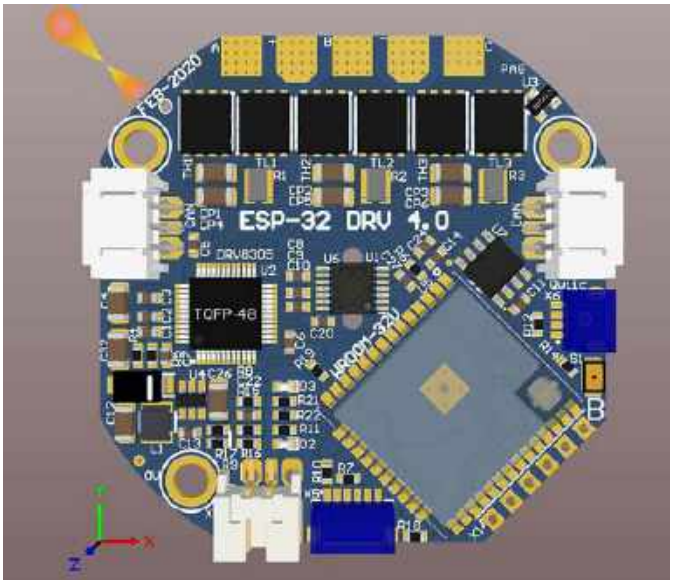
Maksymalna odległość transmisji zależy od widoczności i warunków pogodowych. Przy braku bezpośredniej widoczności, z kilkoma małymi wzgórzami i domami po drodze, udało się osiągnąć do 700 metrów przy pracy z poziomu ziemi, 1500 m, gdy nadajnik znajdował się w oknie, 4 metry nad ziemią i 4300 metrów, gdy transmisja prowadzona była z okna na poddaszu, 10 metrów nad ziemią.

https://bit.ly/2TnIY0K

Kontroler silnika BLDC na ESP32

Projekt jest oparty na wcześniejszej konstrukcji autora, która wykorzystywała mikrokontroler z rodziny PSoC 4. Teraz autor zastosował moduł ESP-32 WROOM-32D. System ma wbudowany magnetyczny enkoder absolutny z interfejsem SPI (do określania pozycji osi) i możliwość podłączenia zewnętrznego enkodera magnetycznego także poprzez SPI do określania pozycji silnika BLDC. Zasilanie silnika sterowane jest przez sześć tranzystorów SIR638ADP-T1-RE3 i inteligentny sterownik MOSFET DRV8305 z 3 sensorami do pomiaru prądu (boczniki 1 mΩ w konfiguracji Kelvina).

eprasa.pl 85168ce91e

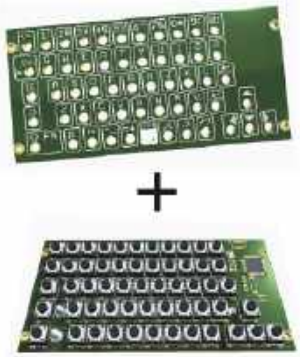


Mikrokontroler monitoruje temperaturę MOSFET-ów na płytce, a także ma wejście na zewnętrzny czujnik temperatury, do monitorowania np. temperatury silnika. Układ może być sterowany poprzez analogowy potencjometr podłączony do przetwornika ADC na płytce lub przez jeden z interfejsów cyfrowych, zaimplementowanych w module: Wi-Fi, Bluetooth, CAN 2.0B, RS485. Interfejs UART, wyprowadzony na module, służy do programowania modułu z ESP32, a interfejs I²C na złączu w standardzie Qwiic pozwala na podłączenie wyświetlacza OLED.

http://bit.ly/38xL2Zd

Miniklawiatura dla Raspberry Pi

Potrzeba jest matką wynalazków – autor samodzielnie zbudował prostą klawiaturę dla Raspberry Pi, gdyż taki moduł nie jest dostępny na rynku, a potrzebował on kompaktowej klawiatury dla swojego systemu. Klawiatura wykonana jest z dwóch płytek drukowanych. Na dolnej znajduje się cała elektronika i przyciski, a górna pełni funkcję obudowy. Autor zastosował mikrokontroler SAMD21. Klawiatura ma 56 przycisków w różnych kolorach. Komunikuje się z komputerem poprzez USB i zgłasza się jako typowe urządzenie HID.

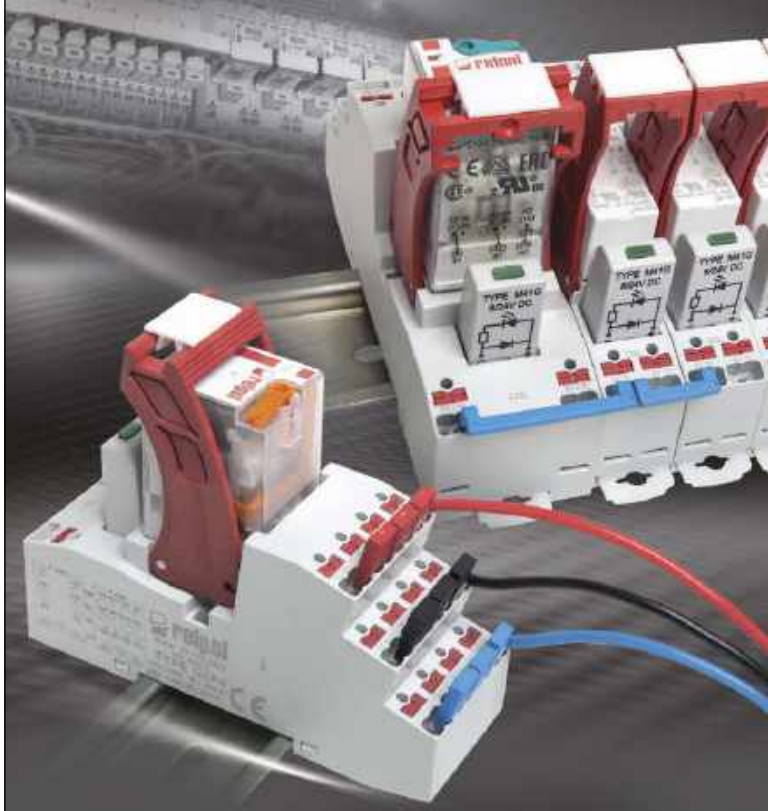


https://bit.ly/35u1aeW

REKLAMA

relpol® S.A.

Przekaźniki interfejsowe
w technologii Push-in



Swobodne mostkowanie
w każdej aplikacji
(2-polowe złącza i zworki)

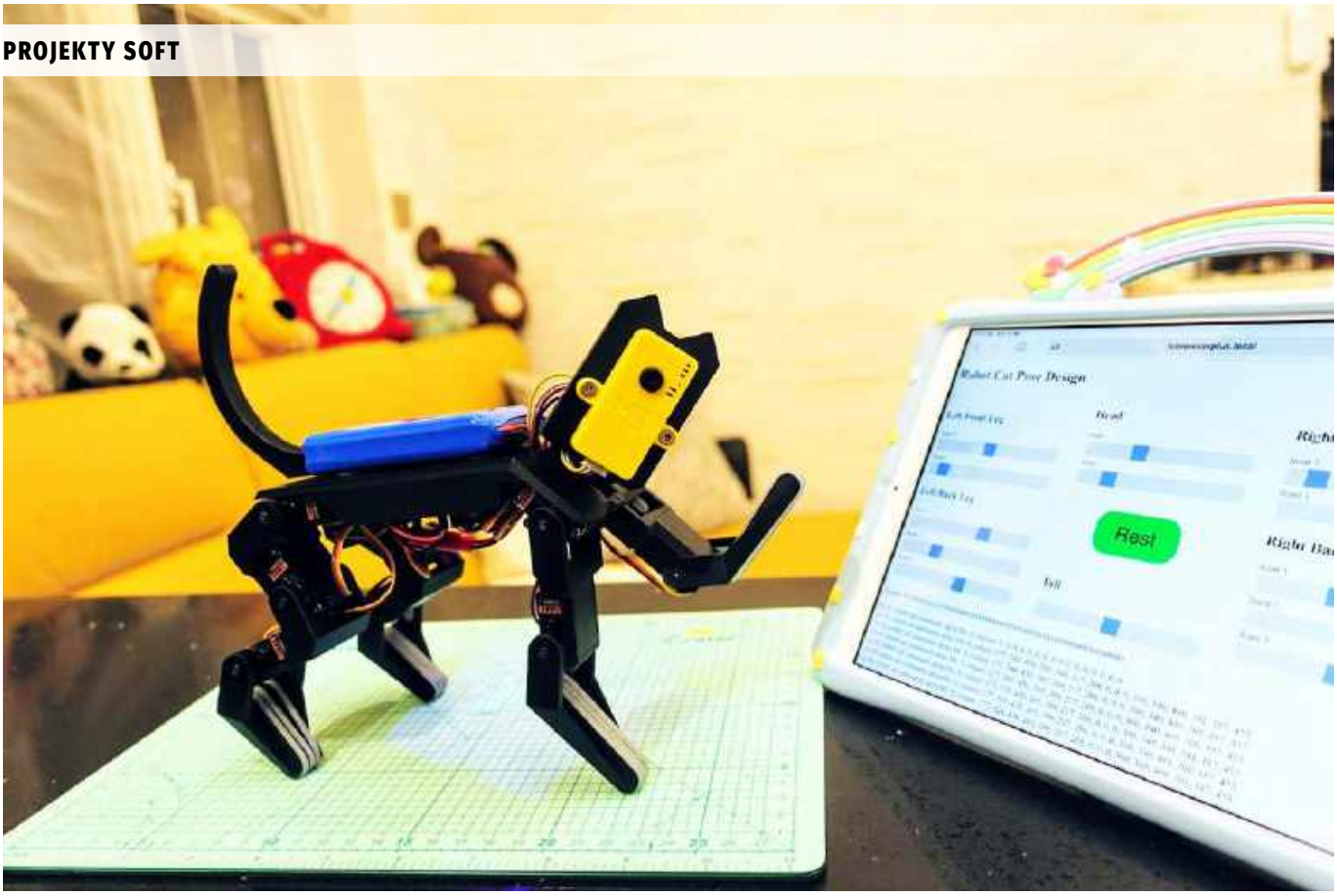
Łączenie wejść
nawet 8 przekaźników
(8-polowe złącza grzebieniowe)

Łatwy i szybki montaż
(zaciski pod kątem, w kierunku koryt kablowych)

Bezpieczeństwo i niezawodność
(szybka obsługa w zarządzaniu okablowaniem,
montaż bez użycia narzędzi)

Biuro Obsługi Klienta: tel. 68 47 90 822, 850
sprzedaz@relpol.com.pl, **www.relpol.com.pl**

eprasa.pl 85168ce91e



Koci robot sterowany modułem ESP32

Konstrukcje robotów od dawna są wzorowane na naturze. Na rynku pojawiło się już wiele robotów, nawiązujących swoją konstrukcją do różnych zwierząt. Zaprezentowany w artykule robot wzorowany jest na kocie.

Autor konstrukcji od dawna zafascynowany był robotami – niekoniecznie nawiązującymi swoją formą do zwierząt. Na swoim koncie ma już kopię znanego Strandbeesta, jak i innych konstrukcji Theo Jansena. Konstrukcje te jednak mają na ogół niewiele funkcji, poza umiejętnością przemieszczania się, nie są także zdalnie sterowane.

Najnowszą konstrukcją autora jest robot kot. Jest on sterowany za pomocą mikrokontrolera ESP32, co umożliwia kontrolowanie go poprzez sieć bezprzewodową Wi-Fi. Dzięki wyposażeniu w serwomechanizmy ze sterownikami robot ma wiele stopni swobody i może poruszać się niemalże jak prawdziwy kot.

Bioinspiracje

Aby robot wyglądał jak kot, najpierw trzeba przyjrzeć się, jak wygląda to zwierzę. W szczególności jego szkielet. Na **rysunku 1** pokazano fragment wpisu dotyczącego kota na anglojęzycznej Wikipedii, wraz z rysunkiem samego zwierzęcia i jego szkieletu. Kot jest palcochodem, co oznacza, że stoi i chodzi na palcach. W związku z tym kot ma zauważalne trzy stawy w łapach, podczas gdy np. człowiek ma tylko dwa stawy. W przypadku przednich nóg kota śródręcza są stosunkowo krótkie, w związku z czym trzeci staw nie jest zbytnio widoczny.

W konstrukcji robota autor zastosował dwa przeguby w przednich łapach i trzy przeguby w łapach tylnych. Daje to łącznie 10 serwomotorów w samych tylko łapkach. To odróżnia też konstrukcję tego robota od innych – większość robotycznych zwierzaków ma tylko po dwa przeguby w przednich i tylnych łapach.

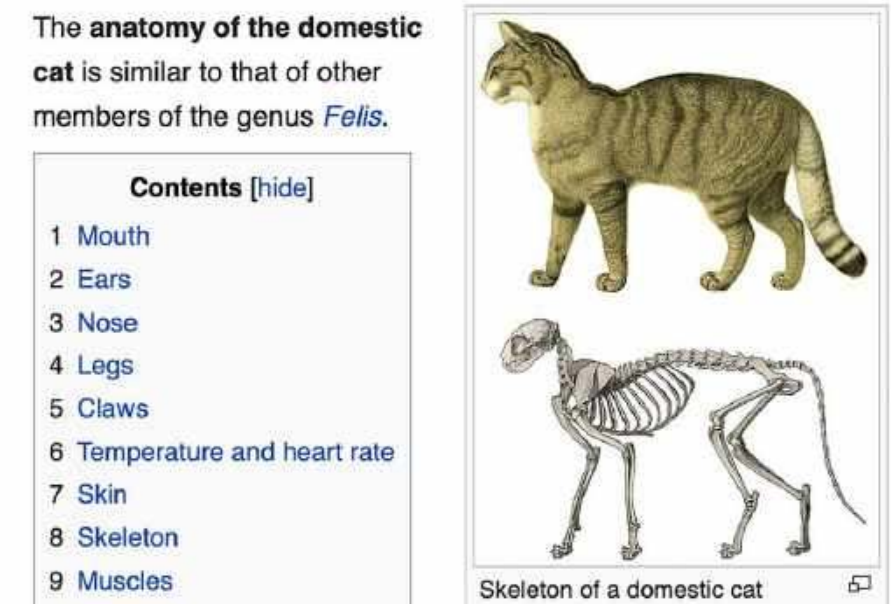
Głowa i szyja powinny mieć wiele ruchomych, obracających się części, aby umożliwić elastyczne zmiany położenia głowy. Jeszcze trudniejszy jest ruch ogona – w rzeczywistości ogon jest połączony z dziesiątkami stawów i mięśni. Autor jednak chce się skupić na ruchu łap, w związki z czym pozostałe elementy robota są mocno uproszczone. Wykorzystał dwa serwa do obracania i kiwania głową oraz jedno serwo do prostego obracania ogonem. Ogon kota normalnie skierowany jest ku ziemi, ale autor konstrukcji zdecydował się na skierowanie go ku górze, dzięki czemu robot lepiej się prezentuje.

Potrzebne elementy

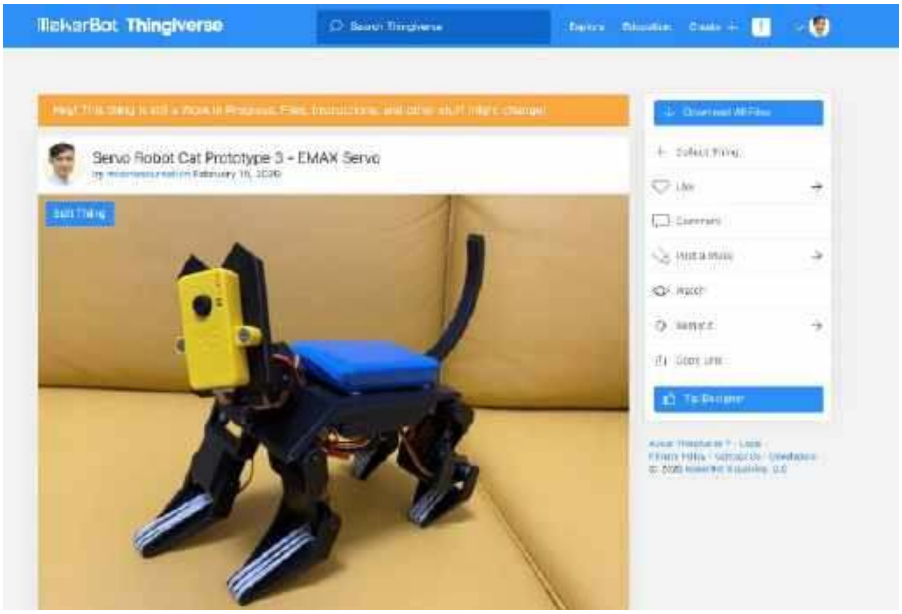
Do budowy robota potrzebne będą następujące elementy elektroniczne i elektromechaniczne:

- Moduł kamery PSRAM M5Stack, który wyposażony jest w mikrokontroler ESP32 i kamerę o rozdzielczości dwóch megapikseli;
- Moduł sterowania PWM/serwomotorami firmy Adafruit. Układ ten ma 16 kanałów i oferuje 12-bitową rozdzielczość sterowania;
- Serwomotory EMAX ES08MA II – 13 sztuk;
- Ogniwo litowo-polimerowe o napięciu wyjściowym 8,4 V. Pamiętajmy, aby zakupić także odpowiednią ładowarkę do tego akumulatora;

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 1. Informacje o anatomii kota domowego (https://bit.ly/3dEDMiy)



Rysunek 2. Projekt kota do druku 3D na portalu Thingiverse

- Stabilizator impulsowy do zasilania mikrokontrolera, kamery itp. (moduł oparty na układzie MP1584EN) oraz przetwornica do zasilania serwomechanizmów (moduł oparty na LM2596);
- Przejściówki ze złączy Grove na zwykłe goldpiny.

Druk 3D

Prezentowany robot jest trzecią iteracją projektu mechanicznego i najpewniej nie ostatnim. Robot jest w pełni wykonany w technologii druku 3D. Wszystkie elementy dostępne są do pobrania na portalu Thingiverse (**rysunek 2**) (https://bit.ly/3kdLVgj). Dzięki temu można wydrukować robota we własnym domu.

Elektronika

Aby robot kot mógł się poruszać jak prawdziwe zwierzę, potrzebne jest elektroniczne sterowanie dla wszystkich jego mechanizmów. Elektronika tego robota jest podzielona na kilka osobnych modułów.

1. Sterownik serwomechanizmów

Optymalizacja konstrukcji mechanicznej robota pozwoliła zmniejszyć liczbę ruchomych części, ale nadal wymaga on 13 serwomechanizmów do poruszania się. Sterowanie taką liczbą serwomechanizmów bezpośrednio z mikrokontrolera nie jest najlepszym rozwiązaniem. Sygnał PWM może zmieniać swoją częstotliwość, gdy mikrokontroler wykonuje inną pracę w tym samym czasie. W takiej sytuacji serwomechanizm może działać niestabilnie lub powodować nieoczekiwane zachowanie. Wykorzystanie dodatkowego sterownika, generującego sygnały do sterowania serwomechanizmów, jest znacznie lepszym rozwiązaniem. Autor zastosował moduł z układem PCA9685. Jest to 16-kanałowy sterownik PWM. Każdy z szesnastu kanałów może być niezależnie konfigurowany z rozdzielczością 12 bitów poprzez interfejs szeregowy I²C. Wprawdzie układ jest przeznaczony do zasilania diod LED (w tym sterowania diodami LED RGBA w układach podświetlenia), ale równie dobrze sprawdza się w sterowaniu serwomechanizmami.

Zanim zainstalujemy wszystkie serwa w robocie, dobrze jest je przetestować. Przykładowy tester do serwomechanizmów można znaleźć na: https://bit.ly/2IENVAh.

2. Moduł z mikrokontrolerem

Do sterowania robotem można użyć wielu różnych mikrokontrolerów. Aby wybrać odpowiedni, autor sporządził listę wymagań:

- wbudowany sensor wizyjny (do wykorzystania na dalszym etapie rozwoju systemu),
- dostatecznie mały, aby zmieścić się w głowie robota,
- wyposażony w interfejs bezprzewodowy,
- wyposażony w interfejs I²C do sterowania modułem kontrolującym serwomechanizmy.

Wszystkie te wymagania spełniał moduł M5Stack pokazany na **fotografii 1.** Jest on wyposażony w SoM (System-on-Module) ESP32 firmy Espressif Systems, który zapewnia nie tylko kontrolę systemu, ale ma wbudowany interfejs bezprzewodowy, obsługujący komunikację poprzez Wi-Fi oraz

Fotografia 1. Wygląd modułu M5Stack

REKLAMA

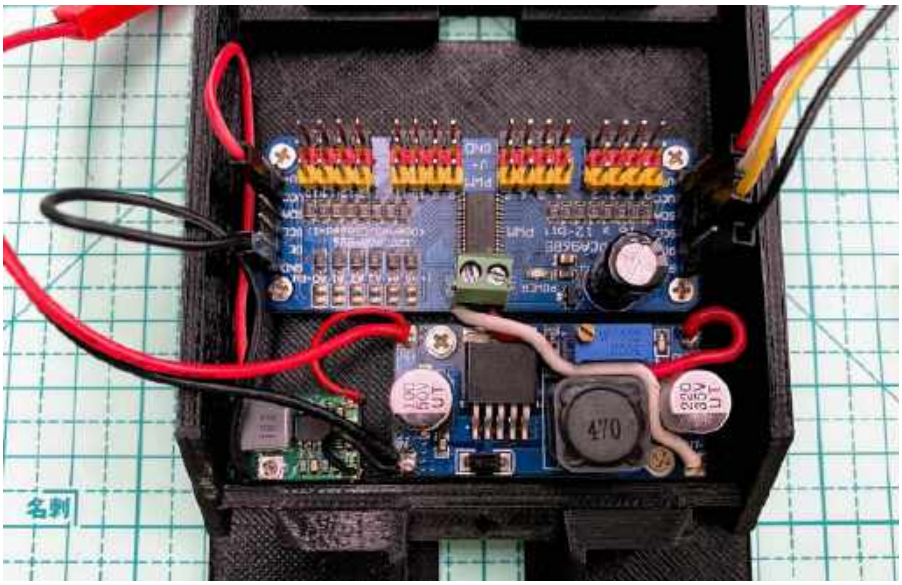
eprasa.pl 85168ce91e

Tabela 1. Zestawienie połączeń elementów elektronicznych w robocie

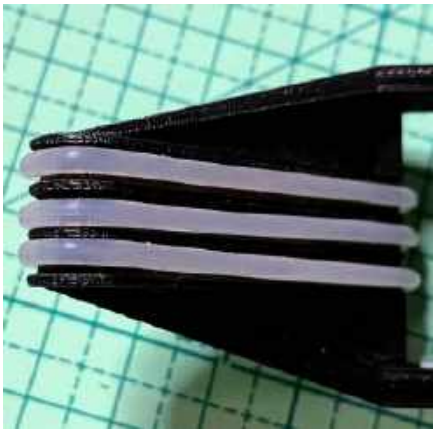
Bateria litowo-polimerowa	
Pin dodatni	Wejście +V stabilizatora napięcia 5 V
	Wejście +V stabilizatora napięcia 6 V
Pin ujemny	Masa wejściowa stabilizatora napięcia 5 V
	Masa wejściowa stabilizatora napięcia 6 V
Płytka sterownika serwomechanizmów PCA9685	
Pin GND	Masa wyjściowa stabilizatora 5 V
	Masa wyjściowa stabilizatora 6 V
	Masa w złączu Grove mikrokontrolera (kabel czarny)
Pin SCL	Linia zegarowa I²C w złączu Grove (kabel żółty)
Pin SDA	Linia danych I²C w złączu Grove (kabel biały)
Pin VCC	Wyjście 5 V ze stabilizatora
	Linia zasilania w złączu Grove (kabel czerwony)
Pin V+	Wyjście 6 V ze stabilizatora (zasilanie serwomechanizmów)

Tabela 2. Lista kanałów sterowania i odpowiadające im funkcje serwomechanizmów

Kanał	Lokalizacja serwomechanizmu
0	Przegub lewej przedniej łapy 1
1	Przegub lewej przedniej łapy 2
2	Przegub lewej tylnej łapy 1
3	Przegub lewej tylnej łapy 2
4	Przegub lewej tylnej łapy 3
5	Skręt głową
6	Pochylenie głowy
7	Niepodłączony
8	Niepodłączony
9	Niepodłączony
10	Ogon
11	Przegub prawej tylnej łapy 3
12	Przegub prawej tylnej łapy 2
13	Przegub prawej tylnej łapy 1
14	Przegub prawej przedniej łapy 2
15	Przegub prawej przedniej łapy 1



Fotografia 2. Centralny element robota z zamontowanymi modułami elektronicznymi



Fotografia 3. Montaż łap robota kota

Bluetooth. Dodatkowo ma kamerę z sensorem OV2640, która umożliwia generowanie od 15 klatek na sekundę przy rozdzielczości 1600×1200 pikseli do 60 klatek przy rozdzielczości 352×288 pikseli. Na płytce znajduje się w pojedyncze złącze w standardzie Grove, na którym wyprowadzono interfejsy I²C praz UART, a także pin GPIO. Moduł można uzupełnić na PCB o sensory takie, jak 9-osiowy moduł inercyjny (MPU6050), czujnik ciśnienia (BME280) i mikrofon analogowy (SPQ2410). Mikrokontroler programowany jest poprzez wbudowany port USB, z wykorzystaniem środowiska Arduino IDE. Więcej o programowaniu układu oraz o użytym firmware w dalszej części artykułu.

3. System zasilania

Podobnie jak większość płytek deweloperskich, moduł kamery M5Stack działa przy zasilaniu napięciem 5 V. Z kolei większość małych serwomechanizmów działa przy napięciu od 5 do 6 V. Moduł z mikrokontrolerem w czasie komunikacji poprzez Wi-Fi będzie pobierał nie więcej niż 150 mA. Z kolei nawet niewielki serwomechanizm pobiera 200 mA i więcej. Przy 13 serwomechanizmach w układzie można się spodziewać szczytowego prądu dochodzącego do 2,6 A. Aby uniknąć wpływu niedoboru mocy na mikrokontroler sterujący robotem, co mogłoby powodować np. zapady napięcia i resety układu, należy zastosować osobne stabilizatory dla serwomechanizmów i dla mikrokontrolera. Napięcie wyjściowe obu stabilizatorów impulsowych, zastosowanych w układzie, jest regulowane. Należy o tym pamiętać i przed podłączeniem docelowych układów ustawić odpowiednie napięcia. Jest to 5 V dla mikrokontrolera oraz 6 V dla sterownika i serwomechanizmów. Jeśli zakupione przez nas serwomechanizmy zasilane są innym napięciem, należy dostosować ustawienie stabilizatora do wymagań naszego sprzętu.

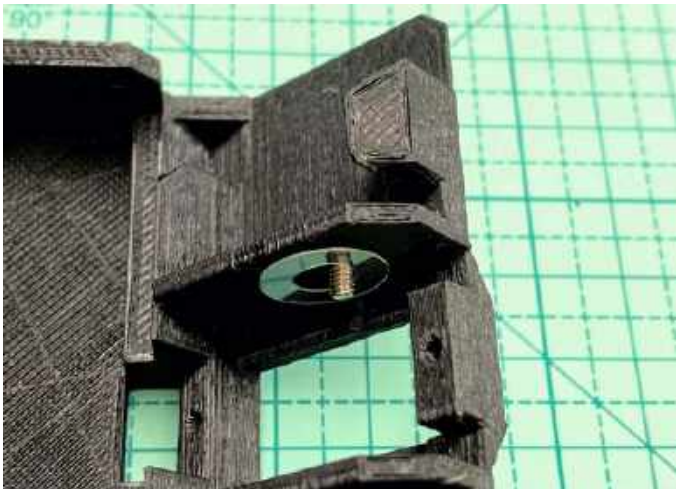
Montaż

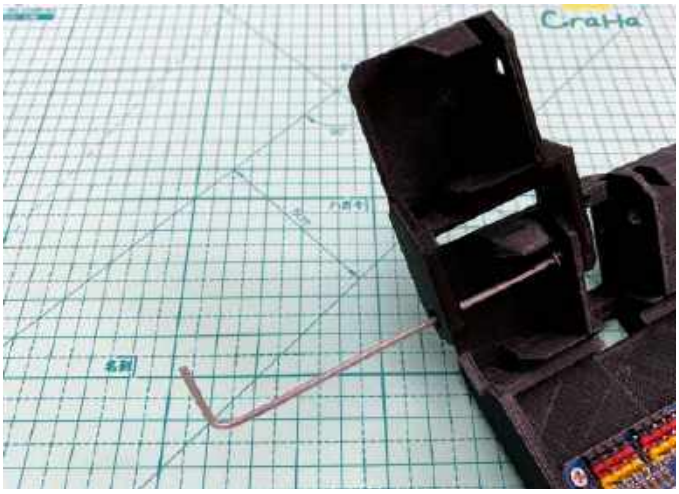
Montaż robota należy zacząć od instalacji komponentów elektronicznych w centralnym elemencie robota. Zmontowany element pokazano na **fotografii 2**. Instalujemy tam moduł do sterowania serwomechanizmami oraz moduły zasilające. W **tabeli 1** zestawiono połączenia w systemie.

Po podłączeniu poszczególnych modułów możemy podłączyć serwomechanizmy. Dobrze jest podpiąć je do sterownika przed instalacją w robocie – oprogramowanie FSBrowserPlus, zainstalowane na mikrokontrolerze, ma wbudowaną inicjalizację początkową serwomechanizmów, która pozwala ustawić wszystkie serwa w środkowej pozycji zakresu obrotu. W **tabeli 2** zebrano informacje o tym, do którego kanału podłączone są poszczególne serwomechanizmy.

Po podłączeniu poszczególnych serwomechanizmów i zresetowaniu ich pozycji można rozpocząć montaż mechaniczny robota. Należy zacząć od złożenia łap robota. Tak jak pokazano na **fotografii 3**, dobrym rozwiązaniem jest nałożenie na nie okrągłego sznurka gumowego. Pozwala to zwiększyć przyczepność robota do terenu. Następnie, tak jak pokazano na **fotografii 4**, rozpoczynamy montaż poszczególnych przegubów w łapach. Później instalujemy przeguby głowy

eprasa.pl 85168ce91e





Fotografia 4. Montaż poszczególnych przegubów w łapach robota

oraz wszystkie serwomechanizmy. Więcej dokładniejszych zdjęć, pokazujących proces montażu robota, znaleźć można na stronie projektu na portalu https://bit.ly/2T6Lj00 (link na końcu artykułu).

Oprogramowanie

Kluczowym elementem systemu jest oczywiście oprogramowanie. Autor, do jego budowy, wykorzystał gotową bibliotekę, dostarczaną dla ESP32 – FSBrowser. Jest to prosty serwer webowy, przeznaczony do udostępniania stron, przekopiowanych do pamięci mikrokontrolera poprzez SPIFFS. Biblioteka wyposażona jest w prosty webowy edytor tekstu, umożliwiający wprowadzanie przez Wi-Fi prostych poprawek w źródle strony oraz proste w obsłudze API, wyposażone w możliwość odczytywania wartości GPIO. Autor uzupełnił tę bibliotekę do wersji, którą nazwał FSBrowserPlus, dodając następujące komponenty:

- API do obsługi płytki z kontrolerem PWM PCA9685 do obsługi serw;
- Serwer WebSocket;
- Stronę z narzędziem do projektowania pozycji robota.

Skrypt wykorzystuje dwie biblioteki:

- ESPAsyncWebServer – do pobrania z: https://bit.ly/2FIXnlc;
- AsyncTCP – do pobrania z: https://bit.ly/353obVG.

Aby wgrać na urządzenie cały program, należy:

1. Zainstalować (jeśli jeszcze go nie posiadamy) Arduino IDE.
2. Zainstalować pakiet wsparcia dla ESP32 dla Arduino IDE. Pozwoli to kompilować i wgrywać programy na ten układ.
3. Pobrać źródła FSBrowserPlus. Dostępne są na repozytorium autora projektu (https://bit.ly/31l2lfw), które można w całości sklonować.
4. Pobrać wspomniane wyżej biblioteki – ESPAsyncWebServer oraz AsyncTCP. Musimy zaimportować je w Arduino IDE, aby środowisko wiedziało, gdzie szukać tych plików źródłowych.
5. Podłączyć moduł M5Stack poprzez USB do komputera.
6. Po uruchomieniu szkicu FSBrowserPlus uzupełnić w kodzie SSID oraz hasło naszej sieci Wi-Fi, z którą łączył będzie się robot.
7. Teraz możemy skompilować i załadować szkic do mikrokontrolera, naciskając przycisk ładowania w Arduino IDE.

Po wgraniu szkicu do mikrokontrolera możemy wejść na załadowaną domyślnie stronę www, która służy do projektowania pozycji robota – https://bit.ly/3lZXLLC w naszej sieci lokalnej.

Dalsze plany

Autor pisze, że jakkolwiek sam projekt rozpoczął się ponad 2 lata temu, to wciąż jest w fazie początkowej. Oczywiście, ma on dalsze plany co do rozwoju projektu. Może zainspirują one także naszych czytelników do rozwinięcia tej konstrukcji. Oto część z nich:

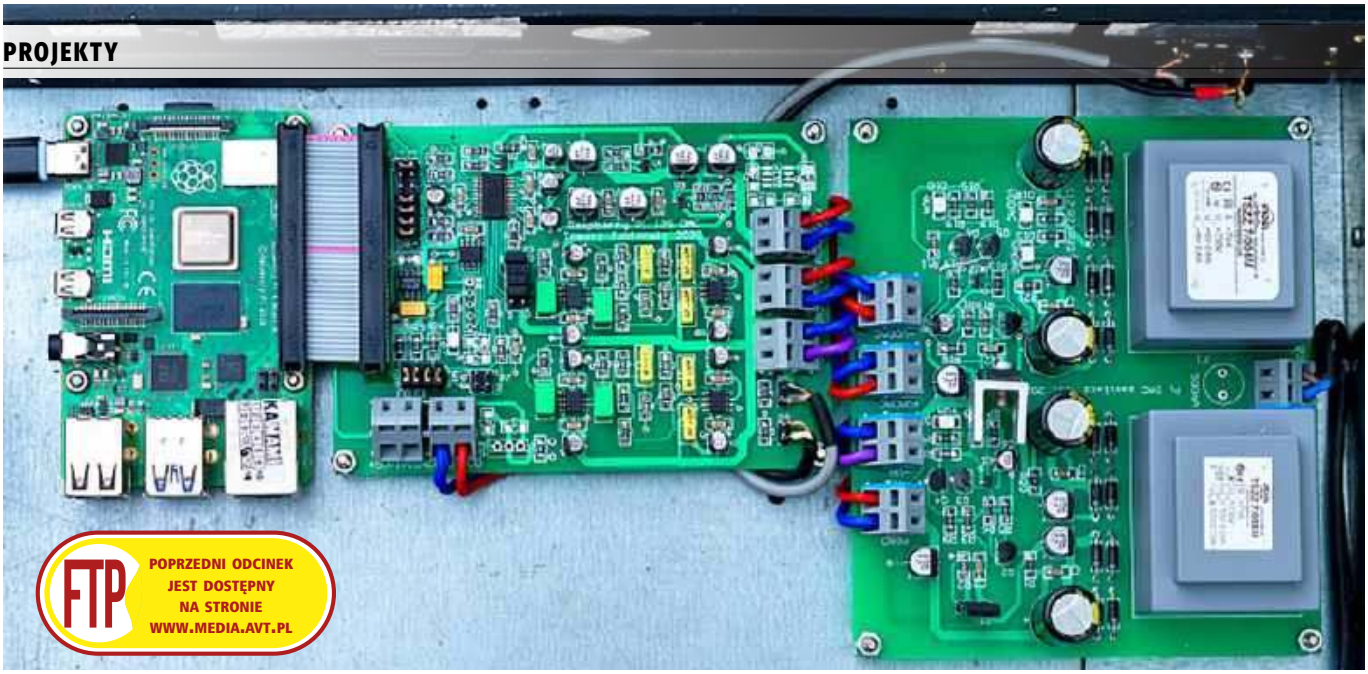
- Rozbudowa edytora pozycji o możliwość zapisywania sekwencji pozycji;
- Zapis pozycji i sekwencji w pamięci mikrokontrolera;
- Obsługa kamery, w tym system widzenia maszynowego do rozpoznawania obrazu;
- Redukcja wagi i lepsze wyważenie konstrukcji, zwłaszcza w sytuacji, gdy tylko 2 łapy dotykają podłoża;
- Dodanie czujników, w tym sensorów nacisku w łapach (aby zagwarantować kontakt z nierównym podłożem), inercyjny czujnik pozycji, mikrofon itp.;
- Więcej stopni swobody, zwłaszcza w szyi i ogonie;
- Dodanie głośnika, aby robot mógł miauczeć.

Nikodem Czechowski, EP

Źródło: https://bit.ly/3lYqi3Z

O projektach, mini, soft i wielu innych dyskutuj na https://forum.ep.com.pl

eprasa.pl 85168ce91e



FTP POPRZEDNI ODCINEK JEST DOSTĘPNY NA STRONIE WWW.MEDIA.AVT.PL

Odtwarzacz audio z Raspberry Pi (2)

Komputerek Rasberry Pi stał się wygodnym źródłem cyfrowego audio. Można na nim uruchomić specjalizowane darmowe oprogramowanie odtwarzacza muzycznego, na przykład Volumio lub podobny, oraz ma interfejs I²S przeznaczony do przesyłania danych audio między innymi do przetworników cyfrowo-analogowych. Raspbbery Pi może też wysyłać dane audio przez port USB lub sygnał S/PDIF (AES3). Pozostaje dołączyć przetwornik analogowo-cyfrowy i możemy cieszyć się muzyką. Tematem prezentowanego projektu jest właśnie taki przetwornik, gwarantujący odtwarzanie dźwięku w wysokiej jakości.
W drugiej części artykułu wyjaśnimy działanie rozwiązań układowych zastosowanych na wyjściach przetwornika DAC oraz omówimy blok zasilania.

Zasilanie układu PCM1794A

Przetwornik ma rozdzielone zasilanie części cyfrowej i analogowej. Dotyczy to zarówno masy, jak i wejść zasilających. Układy cyfrowe są zasilane napięciem 3,3 V ze scalonego stabilizatora U9 LT1763. Jest to niskoszumowy stabilizator LDO o wydajności prądowej 500 mA. Do zasilania układów cyfrowych nie jest niezbędny stabilizator niskoszumowy, ale nic nie stoi na przeszkodzie, aby taki zastosować. Napięcie 3,3 V na szynie VDD, zasilające układ DAC, jest filtrowane parą kondensatorów: elektrolitycznym o niskim ESR: C19 10 µF/16 V i ceramicznym 100 nF. Kondensatory są umieszczone na płytce drukowanej jak najbliżej wejść zasilających VDD i DGND. Tym samym napięciem, filtrowanym ceramicznym kondensatorem C51 o pojemności 100 nF, jest również zasilany układ U7 ICS570B.

W części analogowej zastosowałem nietypowe zasilanie. Układ PCM1794A ma wyprowadzone osobne zasilanie części analogowej kanału lewego VCCL, kanału prawego VCCR oraz wspólnej części analogowej VCC1. Postanowiłem zasilić każde z tych wyprowadzeń z osobnego układu stabilizatora. Do stabilizacji użyłem stabilizatora parametrycznego z rezystorem szeregowym i układem TL431 (*shunt regulator*). Zasadę działania układu stabilizacji z TL431 pokazuje **rysunek 5**.

Układ TL431 jest źródłem napięcia odniesienia o stosunkowo małych szumach i działaniu podobnym do diody Zenera o typowym napięciu referencyjnym V_{ref} równym 2,45 V. Wartość napięcia wyjściowego jest ustalana przez dwa rezystory: R1 i R2, według zależności z rysunku 5. Jeżeli przyjmiemy, że prąd I_{ref} jest pomijalnie mały, a wartości

Dodatkowe materiały do pobrania ze strony www.media.avt.pl

W ofercie AVT* AVT-5811

Podstawowe parametry:
- współpracuje ze specjalizowanym darmowym oprogramowaniem odtwarzacza muzycznego, na przykład Volumio,
- przetwornik DAC typu PCM1794A firmy Texas Instrument,
- zakres dynamiki 127 dB dla sygnału stereo, zniekształcenia THD+N 0,0004%, rozdzielczość 24 bity,
- przesyłanie danych audio z odtwarzacza cyfrowego do przetwornika poprzez interfejs I²S,
- układ przetwornika i komputerka z osobnymi zasilaczami liniowymi.

Projekty pokrewne na www.media.avt.pl:

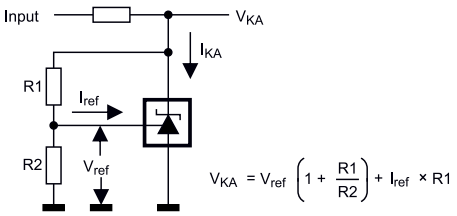
----	Kieszonkowy Linux (EP 9/2020)
AVT-5776	Miniaturowa czujka ruchu dla Raspberry Pi, Arduino i nie tylko (EP 6/2020)
AVT-5770	Arduino i nie tylko (EP 5/2020)
AVT-5761	Czterokanałowy moduł przekaźnikowy sterowany I²C (EP 4/2020)
Projekt 249	Karta muzyczna dla Raspberry Pi (EP 3/2020)
AVT-5739	Zasilacz buforowy z superkondensatorami dla Raspberry Pi (EP 1/2020)
----	Instalacja zegara czasu rzeczywistego w Raspberry Pi (EP 9/2019)
----	Domowy serwer Network Attached Storage na Raspberry Pi (EP 9/2019)
AVT-5689	Budżetowy interfejs USB-I²S (EP 7/2019)
AVT-5680	Sensor smogu z technologią Bluetooth Low Energy (EP 4/2019)

*** 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

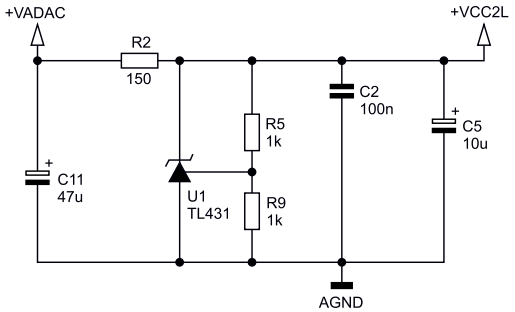
Kity w których występuje układ scalony wymagający zaprogramowania, mają następujące dodatkowe wersje:
- wersja [**A+**] – płytka drukowana [**A**] + zaprogramowany układ [**UK**] i dokumentacja
- wersja [**UK**] – zaprogramowany układ

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 ***http://sklep.avt.pl***, osoby zainteresowane zakupem płytek drukowanych (PCB) prosimy o kontakt via e-mail: kity@avt.pl.

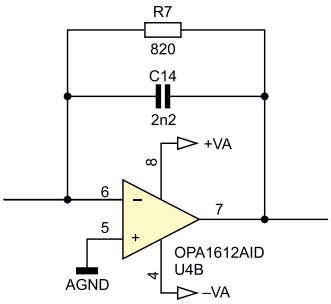
eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 5. Układ stabilizacji z TL431



Rysunek 6. Układ zasilania sekcji analogowej kanału lewego PCM1794A



Rysunek 7. Układ konwertera I/U dla jednego prądowego sygnału różnicowego

rezystorów R1 i R2 wynoszą 1 kΩ, to napięcie na diodzie będzie miało wartość $2 \times V_{ref}$. W naszym układzie napięcie wyjściowe będzie miało wartość ok. 4,9 V, a płynący prąd powinien mieć wartość do 100 mA. Znając te parametry, wartość napięcia wejściowego i zakres prądu pobieranego przez obciążenie, możemy wyliczyć wartość i moc rezystora szeregowego. Na **rysunku 6** pokazano układ zasilania sekcji analogowej kanału lewego PCM1794A. Na szynie zasilającej VCC2L jest napięcie o wartości ok. 4,9 V. Przy takim zasilaniu trzeba pamiętać, że napięcie pomiędzy trzema wejściami zasilania układów analogowych nie może się różnić o więcej niż 0,1 V.

Tego typu stabilizatory mają bardzo małą sprawność energetyczną. Prąd płynący przez rezystor szeregowy, od źródła napięcia do obciążenia, nie zmienia się, niezależnie od prądu pobieranego przez obciążenie. Jeżeli prąd obciążenia maleje, to rośnie prąd płynący przez stabilizator, w naszym przypadku TL431. Jakość stabilizacji zależy głównie od rezystancji dynamicznej diody. Dla TL431 wynosi ona typowo 0,2 Ω, czyli w porównaniu z klasycznymi diodami Zenera zupełnie nieźle. Wydawałoby się, że stosowanie takiego układu zasilania w czasach, kiedy mamy do dyspozycji scalone niskoszumowe stabilizatory LDO z układami wzmacniacza błędu, nie ma większego sensu. Jednak okazuje się, że obwody analogowe przetwornika pobierają w miarę stały i niezbyt duży prąd, więc technicznie takie układy stabilizacji będą poprawnie pracowały. Poza tym, według subiektywnych opinii, tego typu zasilanie powoduje, że dźwięk z przetwornika jest wyczuwalnie inny, w domyśle lepszy. Dodatkowo, oddzielne zasilanie kanałów lewego i prawego przyczynia się do lepszej separacji kanałów. Ponieważ w trakcie projektowania urządzenia nie byłem do końca przekonany do tego rozwiązania, umieściłem na płytce miejsce dla stabilizatora niskoszumowego U11 typu LT1763 5.0, o napięciu wyjściowym 5 V, z możliwością zasilania układów analogowych napięciem 5 V z tego źródła. W prototypie układy analogowe PCM1794A są zasilane przez stabilizatory TL431, a układ U11 nie został zamontowany. Źródłem napięć niestabilizowanych dla stabilizatorów 3,3 V części cyfrowej oraz stabilizatorów *shunt* 5 V części analogowej jest osobny moduł zasilacza, opisany dalej.

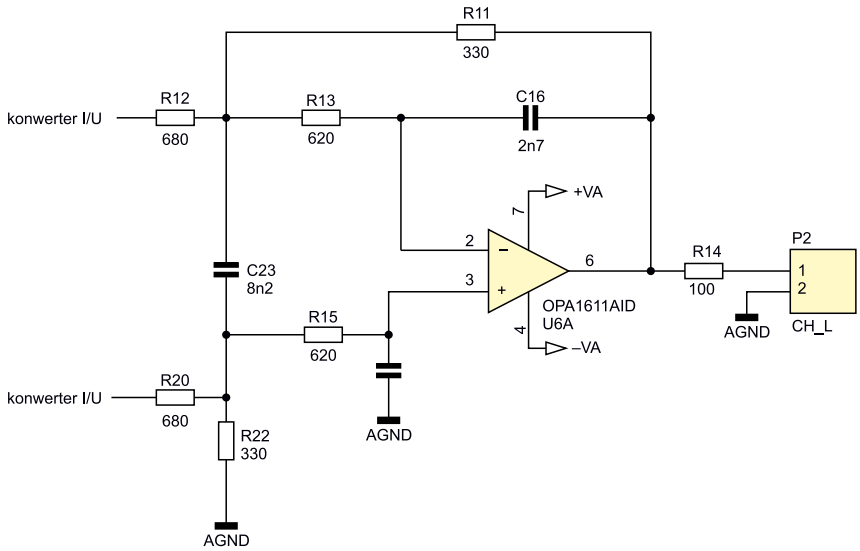
Konwerter prąd-napięcie

Prądowe sygnały różnicowe IOUT– i IOUT+ z wyjść przetwornika są konwertowane na sygnały napięciowe przez układ oparty na niskoszumowym wzmacniaczu operacyjnym. Na **rysunku 7** pokazano układ konwertera I/U dla jednego z wyjściowych sygnałów różnicowych, dostępnych na wyjściu PCM1794A. Dla każdego z kanałów, lewego i prawego, potrzebne są dwa takie układy, czyli w sumie cztery. Jak wspominałem, w wysokiej klasy przetwornikach konwersja I/U jest wykonywana poza układem DAC. Aby taki konwerter spełniał wymogi wysokiej jakości, trzeba zastosować wysokiej klasy wzmacniacz operacyjny. Kryterium wysokiej jakości spełnia zastosowany tu podwójny wzmacniacz OPA1612 z rodziny SoundPlus, produkowanej przez Texas Instruments. To niskoszumowy wzmacniacz z wejściami bipolarnymi, o bardzo małych zniekształceniach nieliniowych, na poziomie 0,000015% dla 1 kHz, dużą prędkością narastania sygnału 27 V/μs i paśmie 40 MHz (dla G=1). OPA1612 może stabilnie pracować jako wtórnik (ze wzmocnieniem G=1).

W układzie konwertera I/U powinien być zastosowany kondensator C14, o dobrych parametrach, i rezystor o jak najmniejszych szumach. W prototypie zastosowałem kondensator polipropylenowy MKP (WIMA) i rezystor metalizowany firmy Royalohm, o tolerancji 1% i mocy 0,25 W, w obudowie SMD1206. Można też zastosować elementy typu MELF do montażu powierzchniowego.

Desymetryzator i filtr dolnoprzepustowy

Różnicowe sygnały napięciowe z układów konwerterów I/U trzeba zamienić na sygnał asymetryczny i poddać filtrowaniu dolnoprzepustowemu, zgodnie z teorią o próbkowaniu sygnałów. Charakterystyka częstotliwościowa filtra może opadać

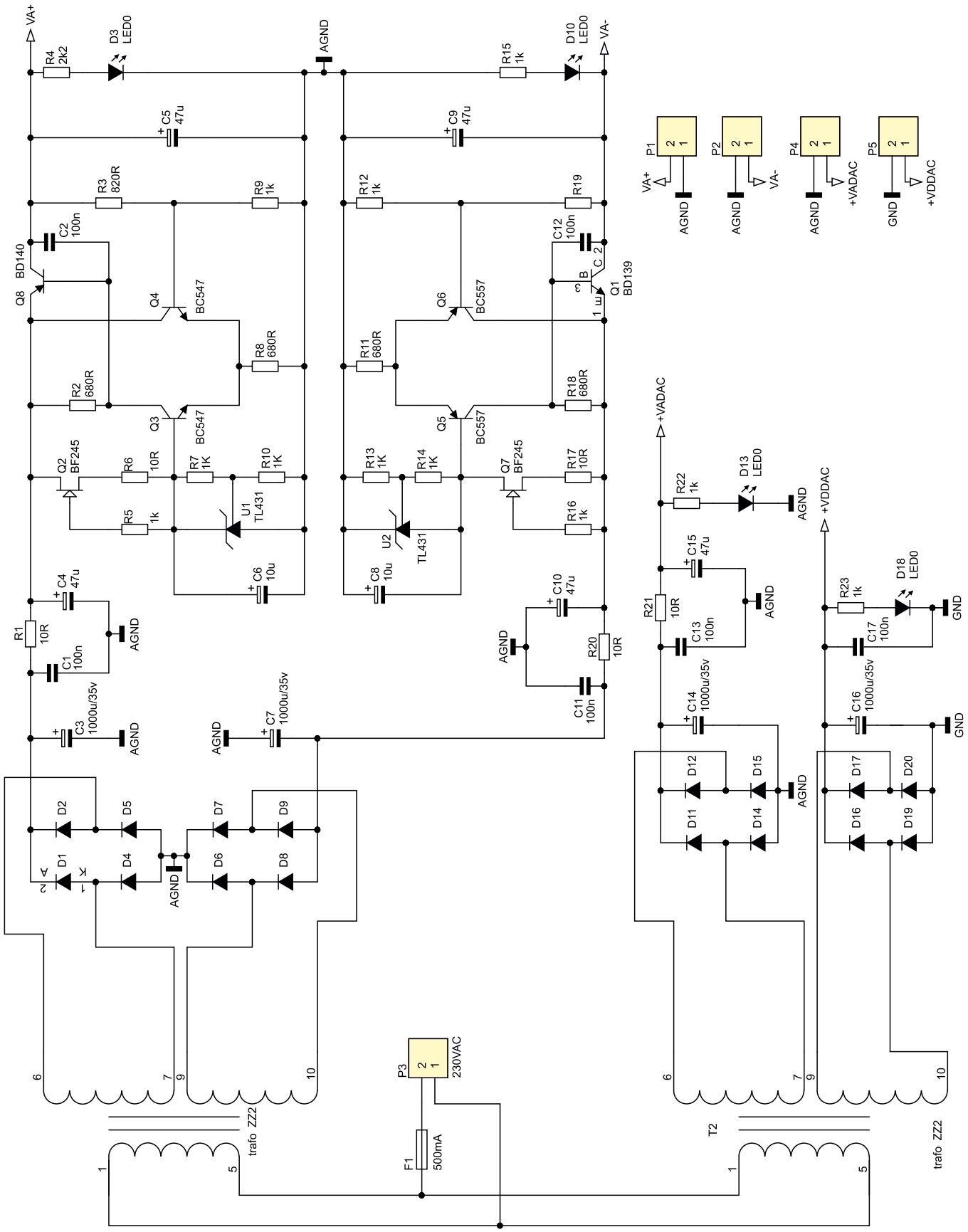


Rysunek 8. Układ desymetryzatora i filtra dolnoprzepustowego dla jednego kanału

REKLAMA

eprasa.pl 85168ce91e

łagodnie, bo sygnał cyfrowy w przetworniku jest 8-krotnie nadpróbkowany. Filtr powinien przenosić bez zniekształceń pasmo częstotliwości do 20 kHz oraz tłumić wszystkie częstotliwości powyżej 8×20 kHz=160 kHz, co jest dość łatwe do wykonania. W praktyce, taki filtr może przenosić pasmo dużo większe, na przykład 30 kHz, po to, żeby w paśmie użytecznym zapewnić jak najlepszą liniowość przenoszenia. Bez nadpóbkowania nie da się tego wykonać. Układ desymetryzatora i filtra dla jednego kanału pokazuje **rysunek 8**. Zastosowano wzmacniacz OPA1611, który ma identyczne parametry jak OPA1612, ale w 8-wyprowadzeniowej obudowie umieszczono tylko jeden wzmacniacz. Elementy zastosowane w filtrze powinny być dobrej jakości. Minimum



Rysunek 9. Schemat modułu zasilacza

eprasa.pl 85168ce91e

to rezystory metalizowane i kondensatory z foliowym dielektrykiem. W prototypie nie ma wymyślnych audiofilskich podzespołów. Zastosowałem metalizowane rezystory do montażu powierzchniowego SMD, w obudowie SMD1206 firmy Royalohm, o tolerancji 1% i mocy 0,25 W, oraz kondensatory poliestrowe MKT, o tolerancji 2,5%. Tak jak w przypadku konwertera I/U można stosować rezystory MELF i na przykład kondensatory polipropylenowe. Niestety nie mogą być one zbyt duże, bo z założenia filtr miał być kompaktowy i nie ma na to miejsca na płytce.

Zasilanie układu

Stabilizatory zasilające obwody cyfrowe i analogowe przetwornika PCM1794A zostały opisane wcześniej. Do zasilania całego układu przetwornika z sieci energetycznej został zaprojektowany moduł zasilacza z dwoma małymi transformatorami, którego schemat pokazano na **rysunku 9**. Moduł został umieszczony na osobnej płytce drukowanej i odpowiada za dostarczenie czterech napięć:

- Niestabilizowanego, o wartości ok. 8,5 V, do zasilania układów cyfrowych przetwornika. Jest ono podawane na wejście stabilizatora U9 typu LT1763 3,3;
- Niestabilizowanego, o wartości ok. 8,5 V, do zasilania układów analogowych przetwornika. Jest ono podawane na wejście trzech układów stabilizatorów *shunt* zasilających obwody analogowe układu PCM1794A;
- Stabilizowanego +9 V do zasilania wzmacniaczy operacyjnych układów konwertera I/U oraz filtra;
- Stabilizowanego –9 V do zasilania wzmacniaczy operacyjnych układów konwertera I/U oraz filtra.

Pierwsze dwa napięcia, o wartości 8,5 V, pochodzą z dwu niezależnych uzwojeń transformatora o mocy 7 VA. Każde z nich ma napięcie znamionowe 6 V AC przy obciążeniu 600 mA. Napięcia są prostowane w prostowniku pełnookresowym i filtrowane kondensatorem elektrolitycznym 1000 µF/25 V. W układzie zasilania obwodów analogowych przetwornika umieszczono dodatkowy filtr RC z rezystorem 10 Ω i kondensatorem 47 µF. Napięcia niestabilizowane są wejściowymi napięciami dla stabilizatorów: U9 zasilającego napięciem +3,3 V układy cyfrowe PCM1794A i dla stabilizatorów TL431 zasilających napięciem +5 V układy analogowe. W przypadku obu tych napięć główną rolę odgrywają omawiane już układy stabilizacji umieszczone na płytce przetwornika.

Trochę inaczej wygląda sprawa w przypadku zasilaczy napięć symetrycznych dla wzmacniaczy operacyjnych. Dotychczas, w zdecydowanej większości przypadków, stosowałem stabilizatory LT317/337 zasilające napięciem symetrycznym układy audio ze wzmacniaczami operacyjnymi. Jeżeli elementy te były oryginalne, kupowane z pewnego źródła, to zasilacz na nich wykonany charakteryzował się

Wykaz elementów:

Rezystory: (SMD1206)
R1, R6, R17, R20, R21: 10 Ω 0,25 W
R2, R8, R11, R18: 680 Ω 1% 0,25 W
R3, R19: 820 Ω 1% 0,25 W
R5, R7, R9, R10, R12…R14, R16, R22, R23: 1 kΩ 0,25 W
R4, R15: 2,2 kΩ 0,25 W

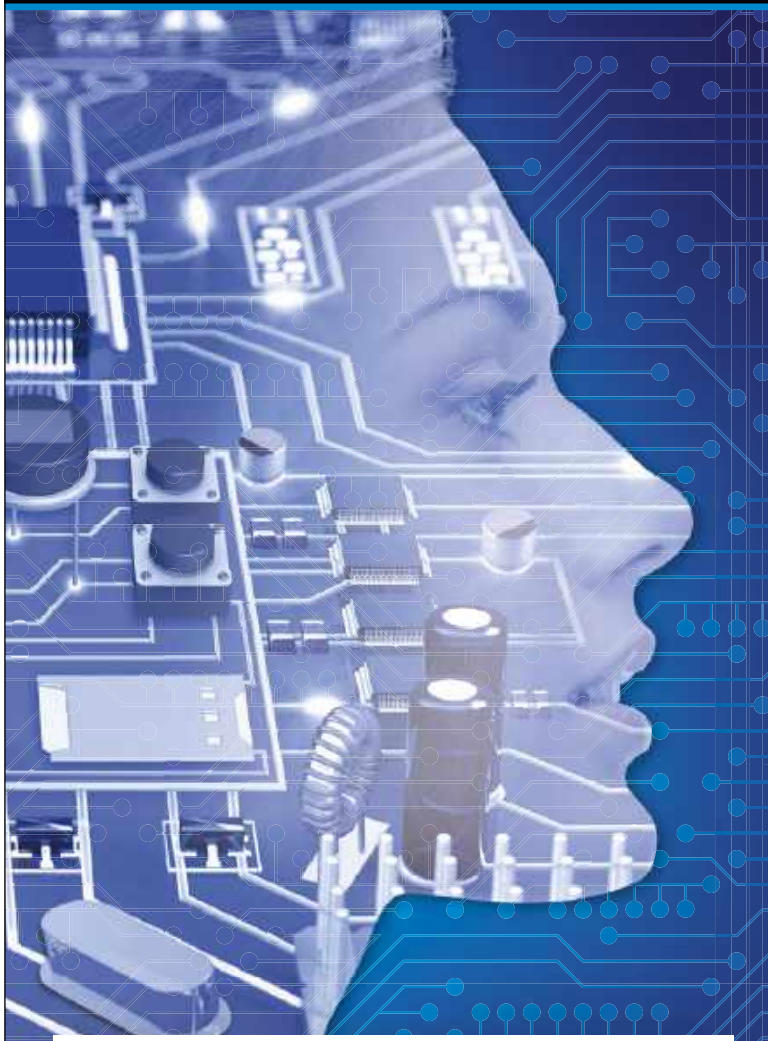
Kondensatory:
C2, C11, C12: 100 nF X7R SMD1206
C6, C8: 10 µF/25 V SME
C4, C5, C9, C10, C15: 47 µF/25 V SME
C3, C7, C14, C16: 1000 µF/35 V

Półprzewodniki;
D1, D2, D4…D9, D11, D12, D14…D16: 1N4007
D3, D10, D13, D18: dioda LED czerwona SMD1206
U1, U2: TL431 (SOT23-3)
Q1: BD139
Q8: BD140
Q3, Q4: BC 547
Q5, Q6: BC 557
Q2, Q7: BF245B

Pozostałe:
T1: INDEL TSZZ 7/008M, 2×12 V AC, 7 VA
T2: INDEL TSZZ 7/004M, 2×6 V AC, 7 VA
F1: bezpiecznik 500 mA w okrągłej obudowie
P1, P2, P4, P5: złączki WAGO sprężynowe

REKLAMA

RUTRONIK
ELECTRONICS WORLDWIDE



ELEMENTY HIGH-TECH
do Twoich innowacji

Jako jeden z wiodących dystrybutorów elementów elektronicznych, oferujemy na całym świecie szeroki wachlarz produktów, kompetentne wsparcie techniczne podczas opracowywania i projektowania produktów, indywidualne rozwiązania logistyczne oraz kompleksowe usługi serwisowe.

- Półprzewodniki
- Elementy elektroniczne bierne
- Elementy elektromechaniczne
- Wyświetlacze i Monitory
- Płyty i Systemy Komputerowe
- Technologie pamęci
- Technologie bezprzewodowe

Informacje o RUTRONI
+48 (32) 461 2000 | rutronik_pl@rutronik.com

www.rutronik.com

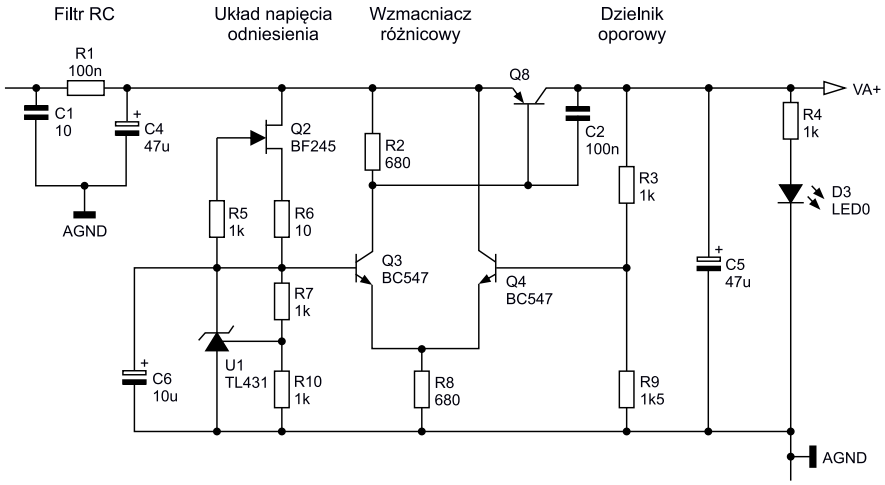
COMMITTED TO EXCELLENCE
Consult | Components | Logistics | Quality

eprasa.pl 8516

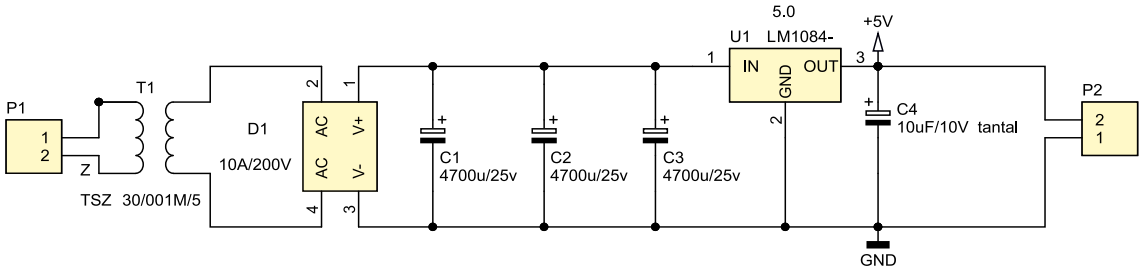
z jednej strony prostotą, a z drugiej strony doskonałymi parametrami, w tym niskim poziomem szumów. Niestety na rynku jest masa podróbek, które nie gwarantują takich parametrów. W ramach eksperymentu zastosowałem w miarę prosty, ale o dobrych parametrach szumowych, układ stabilizatora zbudowany z elementów dyskretnych składający się z klasycznych bloków funkcjonalnych (**rysunek 10**):

- układu napięcia odniesienia o wartości +5 V,
- różnicowego wzmacniacza błędu,
- wyjściowego dzielnika oporowego,
- tranzystora regulacyjnego.

Źródłem napięcia odniesienia jest znany nam już układ TL431 zasilany ze źródła prądowego zbudowanego na tranzystorze FET typu BF245. Napięcie odniesienia ma wartość ok. 4,95 V, jest stabilne temperaturowo i ma niski poziom szumów. Wzmacniacz różnicowy porównuje napięcie odniesienia z napięciem z dzielnika oporowego umieszczonego na wyjściu stabilizatora. Wypracowany w ten sposób sygnał błędu steruje bazą tranzystora wykonawczego, utrzymując na wyjściu zadane, stałe napięcie. Na wejściu stabilizatora umieszczono dodatkowy filtr RC (R1, C4) tłumiący tętnienia sieci. Jako źródło napięcia stabilizatorów napięć symetrycznych zastosowałem transformator sieciowy o mocy 7 VA z dwoma napięciami 12 V AC przy obciążeniu 290 mA. Dla napięć ujemnych układ ma prawie identyczną topologię i jest zbudowany z tranzystorów o przeciwnej polaryzacji.



Rysunek 10. Stabilizator napięcia dodatniego zasilającego wzmacniacze operacyjne



Rysunek 11. Schemat zasilacza 5 V dla Raspberry PI

Zasilanie komputerka Raspberry Pi

W moim odtwarzaczu użyłem Raspberry Pi w wersji 4B z pamięcią 4 GB, dzięki uprzejmości firmy Kamami. Wszystko wskazuje na to, że wydajność zasobów komputerka jest znacznie większa niż potrzeby użytej aplikacji Volumio. Z różnych recenzji wynika, że zupełnie wystarczająca jest poprzednia wersja 3B lub sporo tańsza wersja 4B z mniejszą pamięcią. Według danych ze strony Raspberry Pi do zasilania potrzebne jest stabilne źródło zasilania o napięciu +5 V i wydajności 2,5 A, przy założeniu, że z portu USB pobieramy maksymalnie 500 mA. W testach samego komputerka używałem, z dobrym skutkiem, ładowarki do telefonu o wydajności 2 A.

Konstruktorzy układów audio z Raspberry Pi lub podobnymi komputerkami mają problem z ich zasilaniem. Układ jest taktowany z częstotliwością 1,5 GHz i przy nieodpowiednim zasilaniu może być źródłem zakłóceń EMI przedostających się przez obwody masy do przetwornika. Z tego powodu niektórzy stosują izolację galwaniczną pomiędzy Raspberry Pi a układami cyfrowymi przetwornika, o czym już pisałem przy omawianiu interfejsu I²S. Innym sposobem jest zastąpienie popularnych zasilaczy impulsowych, takich jak w ładowarkach do telefonów, zasilaczem liniowym o odpowiedniej wydajności. Chociaż prawidłowo zaprojektowane pod kątem zakłóceń EMI i wykonane zasilacze impulsowe nie ustępują poziomem zakłóceń zasilaczom liniowym, to trudno takie dostać i są kosztowne.

Ostatecznie zdecydowałem się na zastosowanie zasilacza liniowego o napięciu wyjściowym +5 V i wydajności prądowej 5 A. Jego schemat został pokazany na **rysunku 11**. Transformator sieciowy ma moc 30 VA i dostarcza prądu 5 A przy napięciu 6 V AC. Mostek prostowniczy może prostować prąd o maksymalnym natężeniu 10 A. Kondensatory filtra mają pojemność 3×4700 μF. Wyprostowane i odfiltrowanie napięcie jest stabilizowane przez układ LM1084–5 o napięciu wyjściowym 5 V i ograniczeniu prądowym 5 A. Jest to prosty układ, który jak się okazało, doskonale spełnia swoją funkcję.

Podsumowanie

Jak pisałem w poprzedniej części artykułu, wszystkie zastosowane techniczne zabiegi miały na celu uzyskanie jak najlepszej jakości dźwięku. Nawet obwody zasilania zostały zaprojektowane w sposób niestandardowy, zoptymalizowany do aplikacji audio i dlatego wymagały szczegółowego opisu.

Na tym zakończyliśmy opis konstrukcji elektronicznej. W kolejnej części artykułu zajmiemy się uruchomieniem i, tak wyczekiwanymi, testami odtwarzacza.

Tomasz Jabłoński, EP

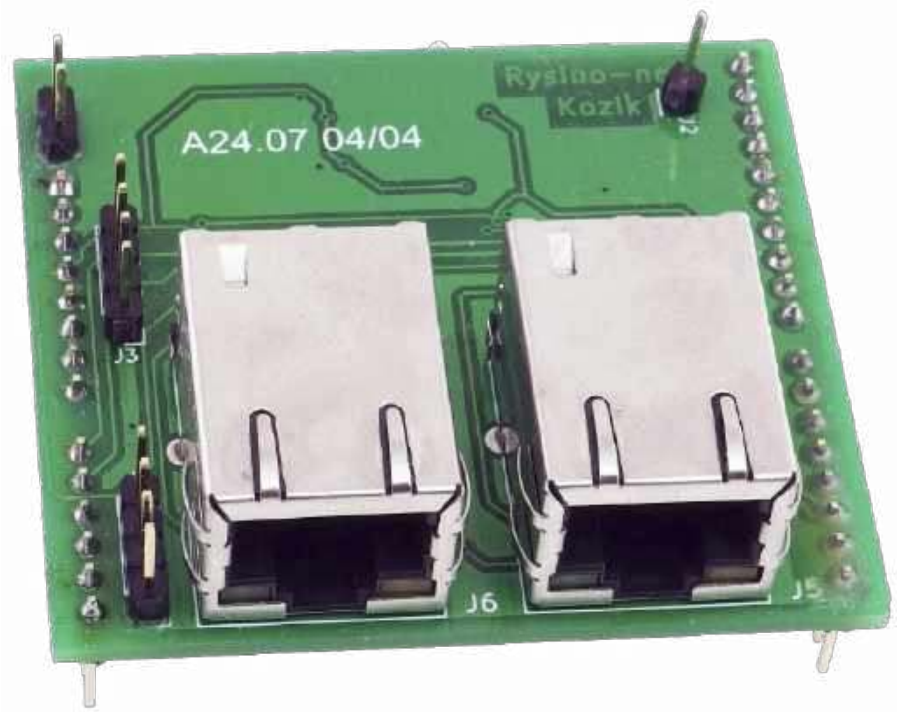
http://forum.ep.com.pl

eprasa.pl 85168ce91e

Shield z Ethernetem

do płytki uruchomieniowej Rysino z układem FPGA Intel Max10

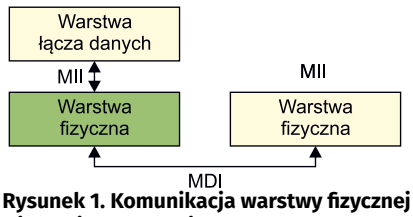
Obecnie chyba najpopularniejszym standardem sieci jest Ethernet. Definiuje on dwie najniższe warstwy stosu sieciowego: fizyczną i łącza danych. Prezentowany projekt realizuje funkcjonalności warstwy pierwszej dla wersji standardu pozwalającej na przesył danych z prędkością 100 Mb/s. Jest to tak zwany Fast Ethernet.



Moduł został zaprojektowany do współpracy z płytką Rysino wyposażoną w układ FPGA Intel Max10. Zawiera warstwę fizyczną dla dwóch portów Ethernet 100 Mb/s. Warstwa fizyczna, tak jak pokazuje to **rysunek 1**, komunikuje się z jednej strony z warstwą łącza danych, a z drugiej z warstwą fizyczną w innym urządzeniu. Komunikacja z wyższą warstwą odbywa się przez jeden z tak zwanych interfejsów niezależnych od medium (*media-independent interface*). Istnieje kilka standardów różniących się szerokością linii danych. My wykorzystamy RMII, czyli *reduce media-independent interface* – zredukowany interfejs niezależny od medium. Składa się on z siedmiu linii:

- RxD[1:0] – dwie linie odbieranych danych,
- CRS_DV – połączony sygnał poprawności odebranych danych i informacji o zajętości łącza,
- TxD[1:0] – dwie linie wysyłanych danych,
- TX_EN – sygnał poprawności nadawanych danych,
- CLK – wspólny zegar o częstotliwości 50 MHz.

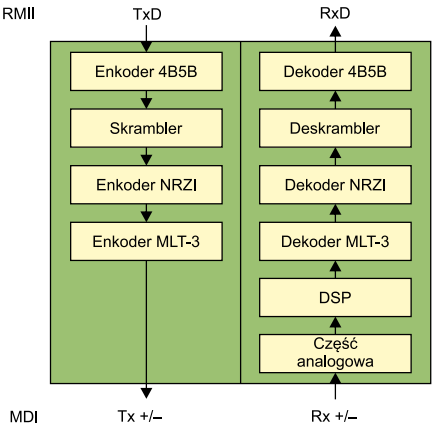
Do połączenia z innymi urządzeniami używany jest tak zwany interfejs zależny od medium (*media-dependent interface*), w skrócie MDI. Zwykle używa się tutaj 8-żyłowej skrętki oraz złączy RJ-45. Jednak wykorzystywane są tylko cztery linie:



Rysunek 1. Komunikacja warstwy fizycznej z innymi warstwami

- Rx+/Rx–: różnicowa linia odbiorcza,
- Tx+/Tx–: różnicowa linia nadawcza.

Na **rysunku 2** zostały pokazuje kolejne operacje realizowane przez warstwę fizyczną. W torze nadawczym na jej wejście przekazujemy kolejne bity ramki. Pierwszym krokiem jest kodowanie 4B/5B. Polega ono na słownikowym zamienieniu kolejnych czwórek bitów na odpowiadające im piątki. Słownik jest częścią standardu Ethernet. Dzięki tej operacji w każdej z kolejnych piątek bitów będą co najmniej dwa równe 1. Następnie znajduje się skrambler, który powoduje pseudolosowe, ale odwracalne mieszanie bitów. Celem tej operacji jest zmniejszenie poziomu szumów, jaki byłby generowany przy kilkukrotnym wysyłaniu pojedynczego 4-bitowego symbolu. Kolejnym krokiem jest kodowanie NRZI, które powoduje nadanie 0, jako utrzymanie poprzedniego stanu, oraz nadanie 1, jako jego zmianę na przeciwny. Kodowanie 4B/5B gwarantuje,



Rysunek 2. Funkcja realizowane przez warstwę fizyczną

Dodatkowe materiały do pobrania ze strony www.media.avt.pl

W ofercie AVT* AVT-5817

Podstawowe parametry:
- moduł przeznaczony do płytki uruchomieniowej Rysino z układem FPGA Intel Max10,
- zawiera warstwę fizyczną dla dwóch portów Ethernet 100 Mb/s,
- bazuje na układzie scalonym DP83848 firmy Texas Instruments,
- komunikacja poprzez interfejs RMII.

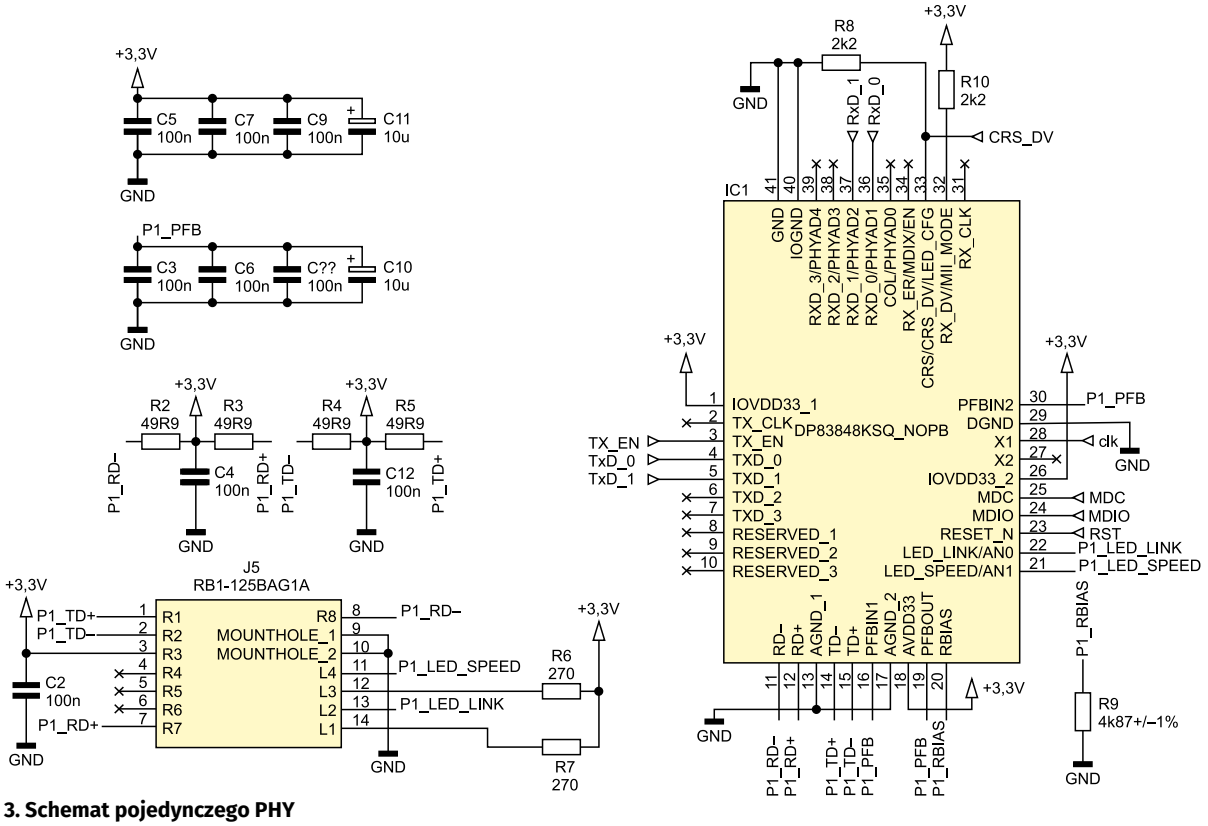
Projekty pokrewne na www.media.avt.pl:
AVT-5777 Moduł interfejsu Ethernet dla Arduino MKR Zero (EP 6/2020)
AVT-5726 Rysino – płytka ewaluacyjna z FPGA Intel MAX10 (EP 11/2019)

*** 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 *http://sklep.avt.pl*, osoby zainteresowane zakupem płytek drukowanych (PCB) prosimy o kontakt via e-mail: kity@avt.pl.

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 3. Schemat pojedynczego PHY

że w kolejnych 5-bitowych blokach wystąpią co najmniej dwie 1, a to odpowiada co najmniej dwóm zmianom znaku.

Do tej pory wykorzystywany był sygnał binarny, jednak mając linię różnicową, możemy na niej łatwo uzyskać 3 stany:

- dodatni (+) – linia dodatnia ustawiona na 1, a ujemna na 0,
- neutralny (0) – obie linie ustawione na 1 albo 0,
- ujemny (–) – linia ujemna ustawiona na 1, a dodatnia na 0.

Z tej funkcjonalności korzysta kodowanie MLT-3. Wtedy, gdy dla NRZI następuje zmiana stanu, tu również ją wykonujemy, ale przechodzimy po kolei przez stany 0, +, 0, –, 0 i tak dalej.

Odbiornik ma bardzo podobną strukturę, lecz tym razem operacje są wykonywane w przeciwnym kierunku. Znajdziemy w nim dwa dodatkowe bloki: część analogową oraz cyfrowe przetwarzanie sygnałów (DSP). Nie jest to część standardu, ale bardziej szczegół implementacyjny. Dzięki nim PHY (warstwa fizyczna) radzi sobie z zakłóceniami powstałymi w linii transmisyjnej. Poza tym warstwa fizyczna jest także odpowiedzialna za wykonanie autonegocjacji. Obie strony informują się o wspieranych rodzajach połączenia (na przykład 100 Mb/s, 10 Mb/s, full/half duplex) i negocjują najszybszą opcję obsługiwaną po obu stronach [1].

Wykaz elementów:

Rezystory:
R1, R20: 1,5 kΩ SMD0603
R2…R5, R11…R14: 49,9 Ω SMD0603
R6, R7, R15, R16: 220 Ω SMD0603
R8, R10, R17, R19: 2,2 kΩ SMD0603
R9, R18: 4,87 kΩ 1% SMD0603

Kondensatory:
C1…C9, C12…C20: 100 nF SMD0603
C10, C11, C21, C22: 10 µF (TMCP0J106MTRF)

Półprzewodniki;
IC1, IC2: DP83848KSQ/NOPB
Y1: 50 MHz DSC1004CI5-050.0000

Pozostałe:
A1: złącze Arduino (goldpin 10×1, 8×1, 6×1, 6×1)
J1, J3: goldpin 4×1
J2: goldpin 1×1
J4: goldpin 2×1
J5, J6: RB1-125BAG1A

Budowa i działanie

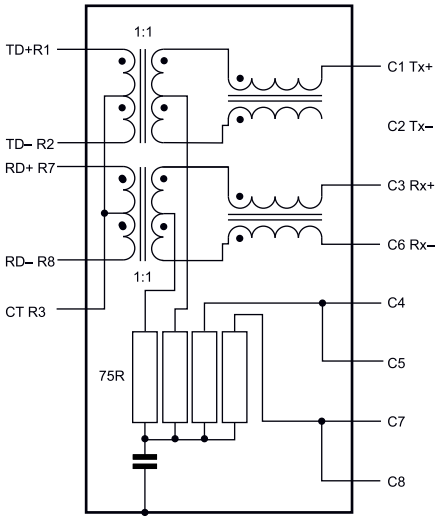
Dzięki dużej popularności, którą zdobył standard Ethernet, dostępne są układy scalone obsługujące warstwę fizyczną. Dzięki temu można ją zrealizować stosunkowo łatwo, z wykorzystaniem jedynie kilku dodatkowych elementów. Na **rysunku 3** został pokazany schemat pojedynczego toru PHY. W projekcie znajdują się dwie takie instancje.

Głównym elementem jest układ scalony DP83848 firmy Texas Instruments [2]. Po stronie MDI widzimy dwie pary rezystorów R2/R3 i R4/R5 podciągające linie transmisyjne do plusa zasilania oraz kondensatory filtrujące C4 i C12. Dalej znajdziemy złącze J5. Jest to gniazdo RJ45 z wbudowanymi transformatorami separującymi oraz sygnalizującymi diodami LED. Jego wewnętrzna budowa została pokazana na **rysunku 4**. Widzimy, że wyprowadzone są jedynie cztery linie używane przez standard Fast Ethernet. Same diody są sterowane bezpośrednio przez układ scalony. Zielona sygnalizuje wspieraną prędkość. Jest zapalona podczas pracy z prędkością 100 Mb/s, a zgaszona, gdy wykorzystana jest prędkość 10 Mb/s. Świecenie się diody żółtej informuje o wykryciu łącza. Gdy odbywa się transmisja, dodatkowo następuje jej miganie. Ten tryb pracy został włączony przez podciągnięcie za pomocą R8 pinu 33 do masy.

Rezystor R9 o wartości 4,87 kΩ zapewnia bias (niezerową wartość napięcia). Natomiast sygnały PFBOUT i PFBIN muszą być ze sobą połączone. Blisko nich muszą zostać umieszczone kondensatory filtrujące C3, C6, C8 i C10.

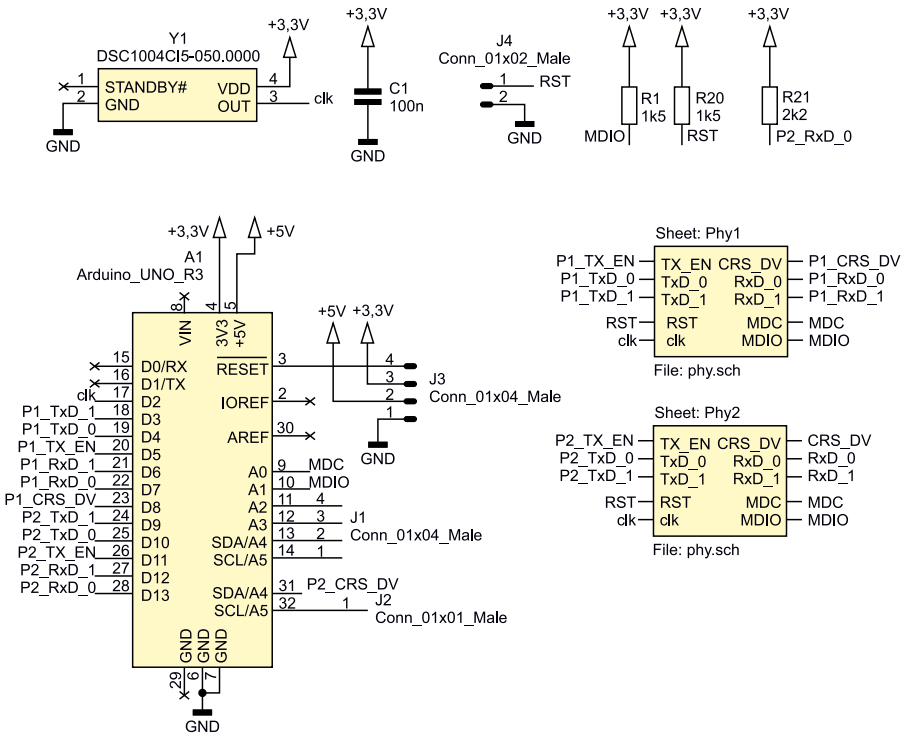
Konfiguracja układu jest wykonywana za pomocą podciągnięcia wybranych linii do masy albo plusa zasilania. Opornik R10 podciąga pin MII_MODE do plusa zasilania, dzięki czemu po starcie układ rozpocznie pracę w trybie RMII.

Część sygnałów została wyprowadzona do modułu nadrzędnego, są to przede wszystkim linie interfejsu RMII. Poza tym został



Rysunek 4. Wewnętrzna budowa złącza RB1-125BAG1A

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 5. Schemat ideowy modułu Rysino-net

Fotografia 1. Widok zmontowanego układu

wyprowadzony interfejs zarządzania, czyli tak zwany MII Serial Management Interface (szeregowy interfejs zarządzający). Używa on dwóch sygnałów: dwukierunkowej linii danych oraz linii wyboru – *data/control*. Ostatnie dwa sygnały to zegar 50 MHz (clk) oraz reset.

Kompletny schemat został pokazany na **rysunku 5**. Widzimy tutaj dwie instancje modułu PHY, który został pokazany na rysunku 3, oraz generator kwarcowy Y1. Sygnał zegarowy o częstotliwości 50 MHz jest doprowadzony do obu PHY oraz do magistrali RMII. Dzięki temu, że na płytce Rysino jest on podłączony do wejścia zegarowego układu FPGA, można go też użyć do jego taktowania. Takie rozwiązanie ułatwia obsługę interfejsu.

Na płytce znajduje się kilka rezystorów podciągających. R1 obsługuje linię danych interfejsu MII SMI, a R20 reset. Ważny jest także opornik R21, który poprzez podciągnięcie zerowej linii danych wejściowych w drugim PHY zmienia jej adres na interfejsie MII SMI z domyślnego 1 na 3.

Na płytce zostały wyprowadzone złącza. A1 to piny typu Arduino, poprzez które można podłączyć moduł do płytki Rysino. Na piny J1 i J2 zostały wyprowadzone wolne wejścia/wyjścia, których można użyć do własnych celów. J3 dostarcza napięć zasilania oraz sygnału reset. Zwarcie J4 spowoduje reset obu PHY.

Montaż i uruchomienie

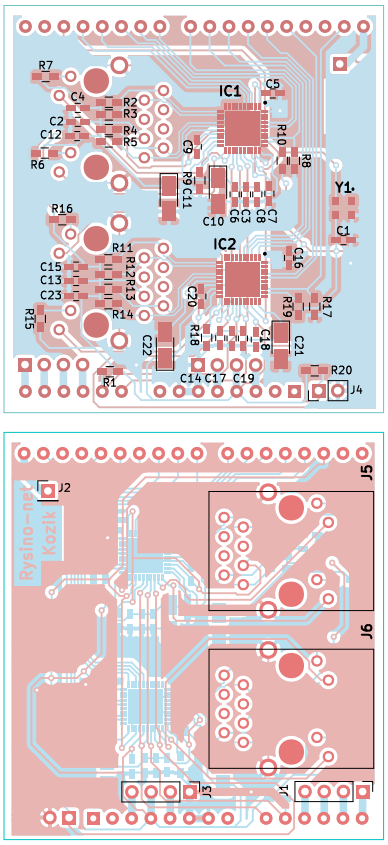
Schemat montażowy został pokazany na **rysunku 6**. Jest to dwustronna płytka drukowana. Lutowanie najlepiej rozpocząć od elementów najmniejszych, a zakończyć na przewlekanych. Po montażu warto sprawdzić za pomocą miernika, czy nie powstały zwarcia. Zdjęcie gotowego modułu pokazuje **fotografia 1**. Generator kwarcowy jest przylutowany „na przewodach", ponieważ w pierwszej wersji płytki wkradł się błąd.

Rysunek 7 pokazuje podłączenie modułu do pinów układu FPGA w płytce Rysino. Taki schemat przyda się podczas przygotowywania projektów w środowisku Quartus. Zegar został doprowadzony do pinu 88, który jest jednym z wejść zegarowych. Interfejs podłączony do wejść D3...D8 obsługuje złącze J5, a do wejść D9...D14 złącze J6.

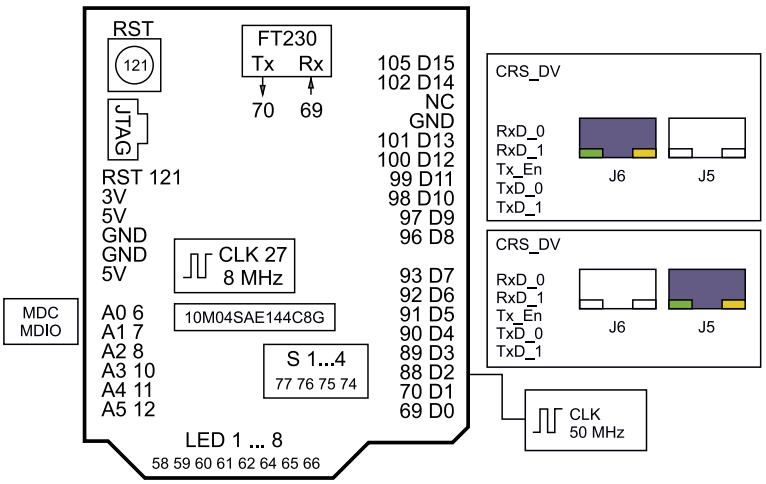
Po włączeniu zasilania obie zielone diody w portach RJ45 powinny się zaświecić. Po podłączeniu przewodu do aktywnego portu zaświeci się także dioda żółta. Taki sam efekt uzyskamy także poprzez połączenie obydwu portów ze sobą. Jeżeli płytka zostanie podłączona do dwuportowej karty Ethernet na komputerze pracującym pod kontrolą systemu Linux, możemy wyświetlić ich stan za pomocą rozkazu:

```
ip a
```

Efekt powinien być podobny do tego poniżej:



Rysunek 6. Schemat montażowy



Rysunek 7. Podłączenie modułu do FPGA w Rysino

eprasa.pl 85168ce91e

```
5: enp37s0f0:
<BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP>
mtu 1500 qdisc mq state UP group
default qlen 1000
  link/ether 00:0a:f7:7e:f9:ac brd
ff:ff:ff:ff:ff:ff
  inet6
fe80::5168:ab03:68ad:519c/64 scope
link noprefixroute
    valid_lft forever preferred_
lft forever
6: enp37s0f1:
<BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP>
mtu 1500 qdisc mq state UP group
default qlen 1000
  link/ether 00:0a:f7:7e:f9:ad brd
ff:ff:ff:ff:ff:ff
  inet6
fe80::f106:6fe4:1f53:4835/64 scope
link noprefixroute
    valid_lft forever preferred_
lft forever
```

Parametry połączenia dla wybranego portu można sprawdzić poleceniem:

```
ethtool enp37s0f0
```

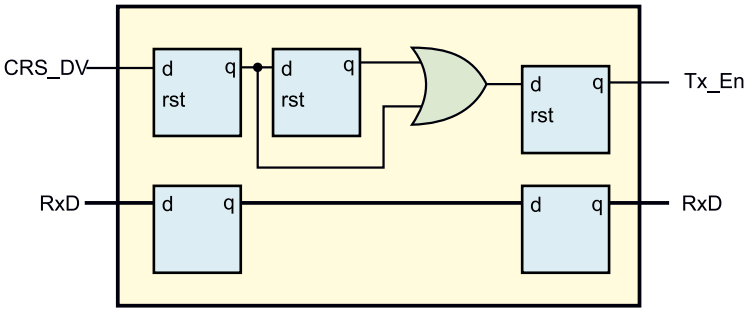
Nazwa portu może się różnić. Oto fragment uzyskanego wyniku:

```
Settings for enp37s0f0:
  Supported link modes: 10baseT/
Half 10baseT/Full
    100baseT/Half 100baseT/Full
    1000baseT/Half 1000baseT/Full
  Supports auto-negotiation: Yes
  Advertised link modes: 10baseT/
Half 10baseT/Full
    100baseT/Half 100baseT/Full
    1000baseT/Half 1000baseT/Full
  Advertised auto-negotiation: Yes
  Link partner advertised
link modes:
    10baseT/Half 10baseT/Full
    100baseT/Half 100baseT/Full
  Link partner advertised auto-
negotiation: Yes
  Speed: 100Mb/s
  Duplex: Full
  Port: Twisted Pair
  Auto-negotiation: on
  MDI-X: off
  Link detected: yes
```

Na początku widzimy prędkości i rodzaje transmisji wspierane przez kartę. Następnie w polach Link partner widzimy informacje rozgłaszane przez nasze PHY. Na końcu znajduje się opis aktywnej konfiguracji. W moim przypadku wynegocjowana prędkość transmisji to 100 Mb/s. Można ją zmienić, używając rozkazu:

```
sudo ethtool –s enp37s0f0 speed
10 duplex full autoneg off
```

Jego wykonanie spowoduje zmianę prędkości na 10 Mb/s. PHY wykryje ten fakt i zgasi zieloną diodę przy odpowiednim porcie. Przywróćmy jednak pierwotne ustawienia:



Rysunek 8. Projekt testowy rmii_echo

```
sudo ethtool -s enp37s0f0 speed
100 duplex full autoneg on
```

Projekt testowy

Do sprawdzenia działania modułu można skorzystać z projektu testowego „Echo". Znajdziemy go w repozytorium [3] w folderze board_test. Na **rysunku 8** pokazano logikę zbudowaną w tym projekcie. Ponieważ sygnał CRS_DV łączy w sobie informację o poprawności danych (*data valid*) z wykrywaniem zajętości linii (*carrier sense*), nie możemy go bezpośrednio połączyć z linią Tx_En. Zastosowana bramka LUB powoduje, że dane wyjściowe są poprawne, gdy na linii CRS_DV panuje stan wysoki w obecnym albo poprzednim kroku. Nie jest to rozwiązanie w pełni poprawne, ponieważ spowoduje, że kilka nadprogramowych danych zostanie przekazanych na wyjście. Nie powinno to jednak wpłynąć na odbieranie pakietów. Gotowy projekt składa się z dwóch takich modułów: po jednym dla każdego PHY.

W ramach testów możemy po prostu wgrać bitstream z pliku *board_test/output_files/board_test.sof*. Do przetestowania jego działania wykorzystamy bibliotekę Scapy [4]. Jest to biblioteka napisana w języku Python, która umożliwia manipulowanie pakietami. Jej najnowszą wersję można pobrać, klonując repozytorium:

```
git clone https://github.com/
secdev/scapy.git
```

Gdy kopiowanie się zakończy, wchodzimy do folderu:

```
cd scapy/
```

I uruchamiamy interaktywną konsolę:

```
sudo ./run_scapy
```

Tworzymy pakiet Ethernet zawierający przykładowy tekst i zapisujemy go w zmiennej p:

```
>>> p = Ether()/
Raw('Rysino-net echo test.
12345678901234567890123 4')
```

Ciąg >>> oznacza znak zachęty terminalu. Ponieważ nie wypełniliśmy pól nagłówka, zostaną one uzupełnione wartościami domyślnymi. Możemy je wyświetlić:

```
>>> p.show2()
WARNING: Mac address to reach
destination not found.
Using broadcast.
###[ Ethernet ]###
  dst= ff:ff:ff:ff:ff:ff
  src= d0:37:45:83:f2:f4
  type= LOOP
###[ Raw ]###
  load= 'Rysino-net echo test.
12345678901234567890123 4'
```

Sprawdźmy także jego długość:

```
>>> len(p)
60
```

Uzyskany wynik to 60 bajtów, a minimalna długość pakietu to 64. Jednak cztery brakujące bajty zostaną dodane przez kartę sieciową. Pełnią one funkcję sumy kontrolnej. Teraz możemy wysłać nasz pakiet przez wybrany interfejs. W moim przypadku jest to enp37s0f0:

```
>>> r=srp1(p, iface="enp37s0f0")
Finished sending 1 packets.
*
Received 1 packets, got 1
answers, remaining 0 packets
```

W raporcie widzimy, że pakiet został wysłany oraz że odebrano odpowiedź. W momencie wysyłania zaobserwujemy także miganie żółtej diody. Możemy wyświetlić odebrany pakiet:

```
>>> r
<Ether  dst=ff:ff:ff:ff:ff:ff
src=d0:37:45:83:f2:f4 type=LOOP
|<Raw  load='Rysino-net echo
test. 12345678901234567890123 4'
|>>
```

Zgodnie z oczekiwaniem jest on identyczny z tym, który wysłaliśmy. Analogiczny test można przeprowadzić dla drugiego portu. Konsolę możemy wyłączyć poleceniem:

```
>>> quit()
```

W artykule została przedstawiona budowa nakładki oraz sposób jej przetestowania. Kolejne doświadczenia zostaną opisane w cyklu „Eksperymenty z FPGA".

Rafał Kozik
rafkozik@gmail.com

Bibliografia:

[1] Spurgeon C. E., Zimmerman J., Ethernet – Biblia administratora kompendium wiedzy o sieciach Ethernet!
[2] DP83848x PHYTER Mini/LS Single Port 10/100 MB/s Ethernet Transceiver, Texas Instruments
[3] Repozytorium projektu: https://bit.ly/2FHa0Nv
[4] Scapy https://bit.ly/34cNtBu

eprasa.pl 85168ce91e

Volta – miniaturowy woltomierz

Inspiracją do powstania niniejszego projektu był inny mój projekt o nazwie Ampera opublikowany na łamach „Elektroniki Praktycznej" w numerze 5/2020. Wspomniany układ jest amperomierzem prądu stałego mającym możliwość alarmowania po przekroczeniu konfigurowalnego progu. Wśród niewielkich przyrządów warsztatowych dobrze byłoby mieć również woltomierz napięcia stałego o podobnej konstrukcji i właśnie w ten sposób narodził się projekt nazwany Volta.

Systemem steruje niewielki, ale nowoczesny mikrokontroler firmy Microchip (dawniej Atmel) typu ATXmega8E5. Wybór tego konkretnego układu z szerokiej palety rodziny AVR nie był przypadkowy. Zależało mi na tym, aby urządzenie odznaczało się dużą dokładnością pomiaru nieokupioną stosowaniem zewnętrznych przetworników ADC. To spowodowało, że odrzuciłem starsze konstrukcje mikrokontrolerów AVR (ATmega i ATtiny), gdyż wyposażono je w niezbyt dokładny, jak na nasze potrzeby, 10-bitowy przetwornik ADC oraz nieprecyzyjne źródło napięcia odniesienia.

Uwagę skierowałem na najnowsze konstrukcje mikrokontrolerów AVR z rodziny ATXmega, serii E. W przypadku tych układów mamy do dyspozycji wbudowany, 12-bitowy przetwornik ADC o zdecydowanie lepszych parametrach elektrycznych, jak i dość dokładne (w porównaniu z poprzednim) źródło napięcia odniesienia, z którego w końcowej aplikacji jednak nie skorzystałem. Zastosowałem tutaj zewnętrzną, bardzo dokładną referencję pod postacią układu LM4040CYM3-2.5 (U3), który nie dość, że bardzo tani, to dodatkowo odznacza się świetnymi parametrami elektrycznymi, co najmniej o rząd wielkości lepszymi niż źródła wbudowane w strukturę mikrokontrolera ATXmega.

Budowa i działanie

Schemat ideowy układu pokazano na **rysunku 1**. Jest to bardzo prosty system mikroprocesorowy, w którym wykorzystano niewielką część wyprowadzeń mikrokontrolera i jego zasobów sprzętowych. Jednak mikrokontroler realizuje następujące zadania: wykonuje cykliczny pomiar napięcia (10 razy/s) doprowadzonego z wejścia VIN poprzez rezystancyjny dzielnik napięcia na wejście PA7 układu. Pomiar wykonywany jest za pomocą 12-bitowego przetwornika ADC pracującego w trybie single-ended. Co ciekawe i charakterystyczne dla mikrokontrolerów typu ATXmega, cała akwizycja danych odbywa się w pełni automatycznie, przy użyciu zasobów sprzętowych układu. Jest to możliwe dzięki powiązaniu ze sobą kilku podsystemów mikrokontrolera: timera TCC5, kanału 0 systemu zdarzeń oraz przetwornika

Dodatkowe materiały do pobrania ze strony www.media.avt.pl

W ofercie AVT* AVT-5820

Podstawowe parametry:
- zakres pomiarowy: 0…50 V,
- rozdzielczość pomiaru: 20 mV,
- dokładność pomiaru: 1%,
- zakres ustawień dla funkcji alarmowania: 0…50 V,
- rozdzielczość ustawień dla funkcji alarmowania: 10 mV,
- zasilanie: 4,5…10 V, ok. 25 mA.

Projekty pokrewne na www.media.avt.pl:

AVT-5766	Ampera – miniaturowy miernik prądu stałego (EP 5/2020)
Projekt 233	3-fazowy woltomierz TRMS (EP 10/2017)
Projekt 232	Miliamperomierz TRMS (EP 9/2017)
AVT-5507	Miernik UIPTR (EP 7/2015)
AVT-5399	Dwukanałowy multimetr panelowy (EP 6/2013)
AVT-5386	Podwójny woltomierz i amperomierz (EP 3/2013)
AVT-5383	Miernik tablicowy UIPt (EP 2/2013)
AVT-5339	Woltomierz cyfrowy (EP 4/2012)
AVT-5333	Multimetr panelowy (EP 3/2012)
AVT-5318	Miernik mocy skutecznej wzmacniacza audio (EP 11/2011)
AVT-5300	VMOD – Uniwersalny miernik napięcia (EP 7/2011)
AVT-5233	3-kanałowy woltomierz (EP 5/2010)
AVT-5182	Wielokanałowy rejestrator napięć (EP 4/2009)
AVT-2857	Moduł woltomierza/amperomierza (EdW 3/2008)

*** 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 *http://sklep.avt.pl*, osoby zainteresowane zakupem płytek drukowanych (PCB) prosimy o kontakt via e-mail: kity@avt.pl.

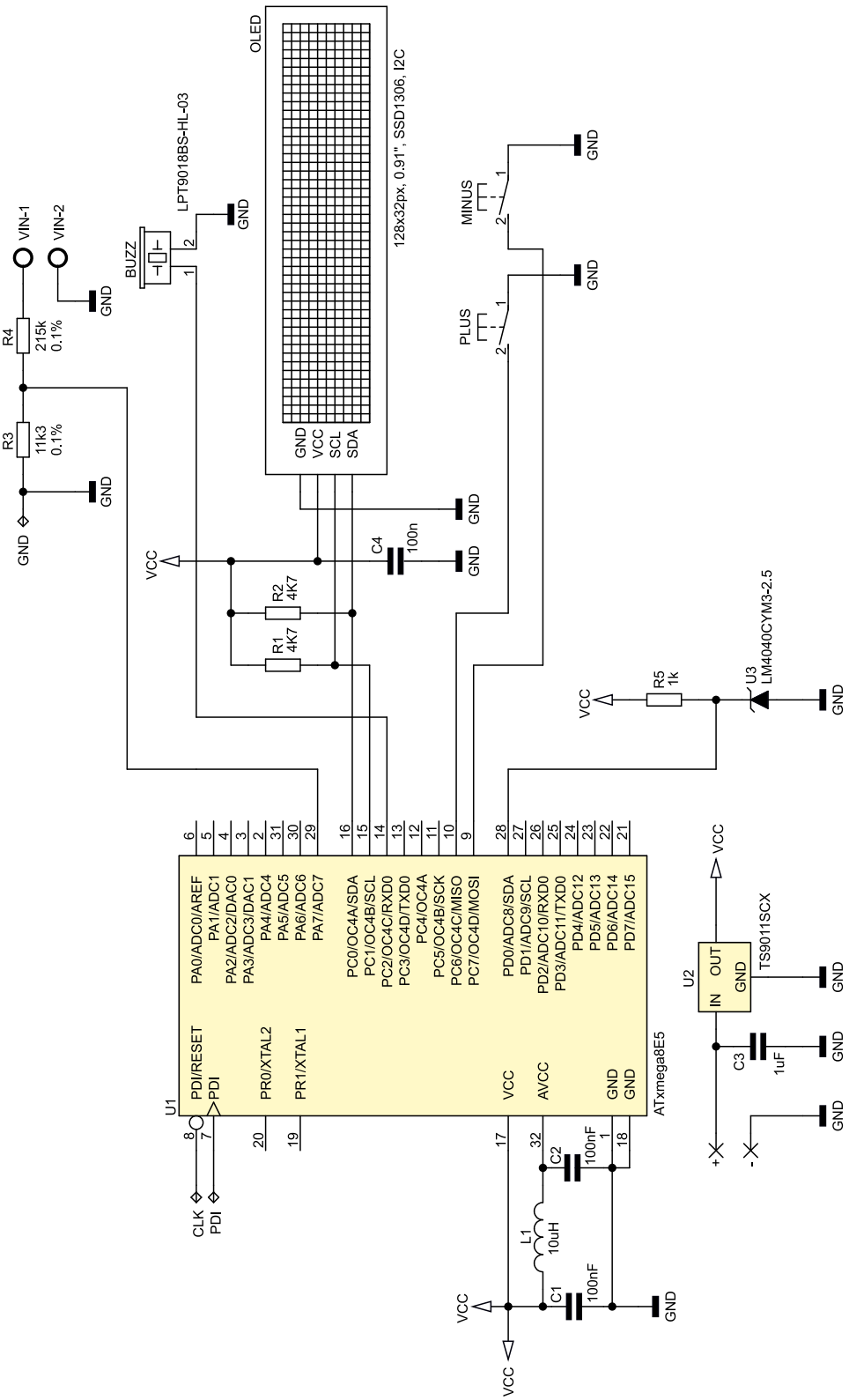
eprasa.pl 85168ce91e

ADC. Powiązanie pokazano schematycznie na **rysunku 2**.

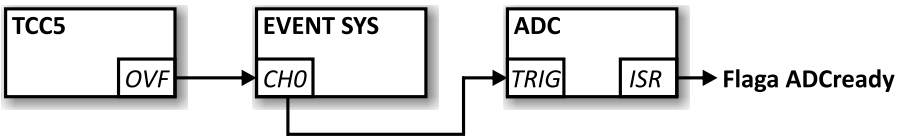
Podstawowym podsystemem mikrokontrolera ATXmega8E5 inicjującym pomiar przetwornika ADC jest układ czasowo-licznikowy TCC5, który jest taktowany wysokostabilnym przebiegiem zegarowym o częstotliwości 250 kHz. Sygnał jest uzyskiwany dzięki podzieleniu zegara 2 MHz taktującego rdzeń mikrokontrolera przez preskaler o podziale 8. Zdarzenie przepełnienia licznika (OVF) jest generoweane co 25000 taktów zegara (PER=24999), czyli 10 razy na sekundę, i jest połączone z kanałem CH0 systemu zdarzeń (EVENT SYSTEM), dla którego stanowi źródło zdarzeń. Kanał CH0 systemu zdarzeń jest z kolei wyzwalaczem (TRIG) dla wbudowanego w strukturę mikrokontrolera przetwornika ADC, dzięki czemu możliwe jest próbkowanie wejściowego sygnału VIN w równych odstępach czasu (10 Hz). Dalej przerwanie od zakończenia konwersji przetwornika ADC (*ADCA_CH0_vect*) odpowiedzialne jest wyłącznie za ustawienie flagi programowej *ADCready* dla programu obsługi aplikacji.

Warto również wspomnieć o innej możliwości automatycznej akwizycji danych, którą początkowo wykorzystywałem w programie obsługi aplikacji. Mowa o podsystemie EDMA, dzięki któremu możliwa staje się akwizycja danych i ich automatyczne umieszczanie w buforze programowym bez udziału rdzenia mikrokontrolera. Dzieje się tak dzięki specjalnym wyzwalaczom podsystemu EDMA, którym dla przykładu może być zdarzenie zakończenia konwersji przetwornika ADC. Muszę przyznać, że początkowo wykorzystywałem tę zaawansowaną możliwość mikrokontrolera rodziny Xmega, lecz z uwagi na fakt, iż program obsługi aplikacji nie wykonuje absolutnie żadnych zadań poza zbieraniem i wyświetlaniem danych w końcowym programie, zrezygnowałem z usług podsystemu EDMA, gdyż nie wnosił on żadnych usprawnień. Ostatecznie system akwizycji urządzenia Volta wygląda dokładnie tak, jak to pokazano na rysunku 2.

Kod odpowiedzialny za inicjalizację układu czasowo-licznikowego TCC5 pokazano na **listingu 1**, zaś kod odpowiedzialny za powiązanie zdarzenia przepełnienia licznika TCC5 z kanałem CH0 systemu zdarzeń na **listingu 2**. Dalej na **listingu 3** pokazano kod odpowiedzialny za inicjalizację przetwornika ADC mikrokontrolera. Jak widać, wybrano 12-bitowy tryb SINGLE ENDED ze znakiem, sprzętowe uśrednianie wyników 16 pomiarów wraz ze sprzętowym przesunięciem wyniku o 4 bity w prawo (dla zwiększenia odstępu sygnału od szumu), zewnętrzne źródło napięcia odniesienia podłączone do portu PD0 mikrokontrolera oraz jako wyzwalacz konwersji kanał CH0 systemu zdarzeń. Ponadto



Rysunek 1. Schemat ideowy urządzenia Volta



Rysunek 2. Schemat blokowy systemu akwizycji danych

eprasa.pl 85168ce91e

Listing 1. Kod odpowiedzialny za inicjalizację układu czasowo-licznikowego TCC5

```
//Uruchomienie timera TCC5
//by przepełniał się 10 razy/sek
//sterowanie akwizycją danych
TCC5.CTRLB = TC_WGMODE_NORMAL_gc;
TCC5.PER = 24999; //10Hz @ 2MHz
TCC5.CTRLA = TC_CLKSEL_DIV8_gc;
```

Listing 2. Kod odpowiedzialny za powiązanie zdarzenia przepełnienia licznika TCC5 z kanałem CH0 systemu zdarzeń

```
//Kanał 0 systemu zdarzeń będzie
//przekazywał zdarzenie przepełnienia TCC5
EVSYS.CH0MUX = EVSYS_CHMUX_TCC5_OVF_gc;
```

Listing 3. Kod odpowiedzialny za inicjalizację przetwornika ADC mikrokontrolera Xmega

```
void initADC(void){
    //ADC config: 12bit single ended, High current limit,
    //External reference, gain = x1, trigger - event ch0
    //ADC Enabled
    ADCA.CTRLA = ADC_ENABLE_bm;
    ADCA.CTRLB = ADC_CURRLIMIT_HIGH_gc|ADC_RESOLUTION_12BIT_gc|ADC_CONMODE_bm;
    //50ksps max sampling rate, signed 12-bit right-adjusted result
    //External reference on PORT D
    ADCA.REFCTRL = ADC_REFSEL_AREFD_gc;
    //First event triggers channel conversion
    ADCA.EVCTRL = ADC_EVSEL_0_gc|ADC_EVACT_CH0_gc;
    //500kHz @ 2MHz
    ADCA.PRESCALER = ADC_PRESCALER_DIV4_gc;
    ADCA.CH0.CTRL = ADC_CH_GAIN_1X_gc|ADC_CH_INPUTMODE_SINGLEENDED_gc;
    //pin PA7
    ADCA.CH0.MUXCTRL = ADC_CH_MUXPOS_PIN7_gc;
    //Interrupt on conversion complete
    //High level
    ADCA.CH0.INTCTRL = ADC_CH_INTMODE_COMPLETE_gc|ADC_CH_INTLVL_HI_gc;
    //Averaged 16 samples and right shifted by 4
    ADCA.CH0.AVGCTRL = (4<<4)|ADC_CH_SAMPNUM_16X_gc;
}
```

Listing 4. Kod funkcji obsługi przerwania przetwornika ADC odpowiedzialnej za akwizycję danych

```
//Makra akwizycji danych
#define DATA_ACQUISITION_ON TCC5.CTRLA = TC_CLKSEL_DIV8_gc
#define DATA_ACQUISITION_OFF TCC5.CTRLA = TC_CLKSEL_OFF_gc

ISR(ADCA_CH0_vect){
    ADCready = 1;
    //Wyłączenie akwizycji danych
    DATA_ACQUISITION_OFF;
}
```

Listing 5. Kod odpowiedzialny za inicjalizację układów czasowo-licznikowych TCC4 i TCD5

```
//Uruchomienie timera TCC4 w trybie PWM typu Single Slope
//obsługa buzzera piezo
TCC4.CTRLB = TC_WGMODE_SINGLESLOPE_gc;
TCC4.PER = 249;  //4kHz @ 2MHz
TCC4.CCC = 125;  //Duty cycle 50%
//Output Compare enabled on OC4C pin
TCC4.CTRLE = TC_CCCMODE_COMP_gc;
PORTC.DIR |= PIN2_bm;  //OC4C as output

//Uruchomienie timera TCD5 by przepełniał się 100 razy/sek
//obsługa klawiatury i timery programowe
TCD5.CTRLB = TC_WGMODE_NORMAL_gc;
TCD5.PER = 2499;  //100Hz @ 2MHz
TCD5.CTRLA = TC_CLKSEL_DIV8_gc;
TCD5.INTCTRLA = TC_OVFINTLVL_MED_gc;
```

uruchomiono przerwanie po konwersji przetwornika ADC odpowiedzialne za akwizycję danych **listingu 4**.

Uważny Czytelnik zastanowi się zapewne, dlaczego wybrano tryb ze znakiem, skoro nie zamierzamy mierzyć napięć ujemnych względem masy. Takie ustawienie zmniejsza wynikową rozdzielczość przetwornika ADC z 12 na 11 bitów, gdyż jeden z bitów poświęcany jest na znak (+/–) wartości wynikowej. Otóż przetwornik ADC wbudowany w strukturę mikrokontrolera ATXmega8E5 w konfiguracji SINGLE ENDED i bez znaku (czyli w pełnej 12-bitowej rozdzielczości) jest w stanie mierzyć napięcia z zakresu –ΔV…Vref–ΔV, gdzie ΔV jest offsetem wprowadzanym do pomiaru równym w przybliżeniu 0,05×Vref, co daje w naszym przypadku wartość 125 mV (gdyż Vref=2,5 V). Funkcjonalność tę wprowadzono głównie po to, by mikrokontroler był w stanie w łatwy sposób wykrywać przejście mierzonego sygnału przez 0, co w założeniach miało uprościć implementację wszelkiego rodzaju falowników i innych układów sterujących. Finalnie sprowadza się do tego, że napięciu równemu 0 V (GND) nie odpowiada oczekiwana wartość wynikowa ADC równa 0, a wielkość offsetu zbliżona do bezwzględnej wartości w zakresie 200…205. Co więcej, wartość ta zależna jest od egzemplarza danego mikrokontrolera i należałoby ją wyznaczyć w procedurze kalibracji polegającej na zwarciu wejścia pomiarowego ADC do masy i pomiarze wartości wynikowej ADC. Kolejnym ograniczeniem tego trybu pracy jest maksymalny zakres pomiarowy przetwornika ADC, który w tym wypadku wynosi 0,95×Vref (2,375 V), co po przeskalowaniu przez wejściowy dzielnik napięciowy

Wykaz elementów:

Rezystory: (SMD 0805)
R1, R2: 4,7 kΩ
R3: 11,3 kΩ 0,1%
R4: 215 kΩ 0,1%
R5: 1 kΩ

Kondensatory: (SMD 0805)
C1, C2, C4: 100 nF X7R
C3: 1 µF X7R

Półprzewodniki:
U1: ATXmega8E5-AU (TQFP32)
U2: TS9011SCX (SOT23)
U3: LM4040CYM3-2.5 (SOT23)
OLED: wyświetlacz OLED 128×32 px, 0,91", SSD1306, I2C, 38×12 mm

Pozostałe:
L1: dławik SMD 10 µH (SMD 0805)
PLUS, MINUS: mikroprzełącznik SMD typu DTSM31NB
BUZZ: przetwornik piezoelektryczny typu LPT9018BS-HL-03-4.0-12-R
VIN: AK500/2

odpowiada wejściowemu napięciu o wartości 47,5 V. Biorąc to wszystko pod uwagę, ostatecznie zrezygnowałem z pełnej rozdzielczości równej 12 bitów ograniczonej w wyżej przytoczony sposób, lecz zdecydowałem się na tryb SINGLE ENDED ze znakiem, który po pierwsze nie wymaga kalibracji, a po drugie zmniejsza wynikową rozdzielczość pomiaru do 11 bitów.

Zakończeniu konwersji danych ADC towarzyszy zatrzymanie akwizycji danych (wyłączenie timera TCC5) oraz ustawienie flagi *ADCready*, dzięki czemu możliwe jest przetworzenie danych (rejestr ADCA.CH0RES mikrokontrolera) przez program główny aplikacji. Tyle w kwestii wspomnianej akwizycji danych.

Kolejne podsystemy mikrokontrolera, które używane są w aplikacji urządzenia Volta, to dwa dodatkowe układy czasowo-licznikowe, a mianowicie TCC4 i TCD5. Pierwszy ze wspomnianych timerów (TCC4) pracuje w trybie PWM typu Single Slope i odpowiada za obsługę buzzera piezo, generując przebieg prostokątny o częstotliwości 4 kHz na wyprowadzeniu PC2 mikrokontrolera, zaś drugi (TCD5) pracuje w trybie normalnym skonfigurowany tak, by przepełniał się 100 razy/s i odpowiedzialny jest za obsługę klawiatury (debouncing), jak i timery programowe. Kod odpowiedzialny za inicjalizację obu układów czasowo-licznikowych pokazano na **listingu 5**.

REKLAMA

eprasa.pl 85168ce91e

Listing 6. Funkcja odpowiedzialna za inicjalizację interfejsu TWI mikrokontrolera Xmega

```
void TWIinit(void){
    //Ustawienie kierunków portów SDA i SCL
    SDA_DIR_REG |= (1<<SDA_PIN);
    SCL_DIR_REG |= (1<<SCL_PIN);
    //Ustawienie częstotliwości zegara SCL = 200kHz
    //FTWI = F_CPU/2*(5+BAUD)
    TWIC.MASTER.BAUD = 0;
    //Odblokowanie modułu TWI master
    TWIC.MASTER.CTRLA = TWI_MASTER_ENABLE_bm;
    //Początkowe wykasowanie wszystkich flag
    TWIC.MASTER.STATUS |= TWI_MASTER_RIF_bm|TWI_MASTER_WIF_bm| TWI_MASTER_ARBLOST_bm|TWI_MASTER_BUSERR_bm;
    //Ustawienie stanu wyjściowego interfejsu TWI
    TWIC.MASTER.STATUS |= TWI_MASTER_BUSSTATE_IDLE_gc;
}
```

W tym miejscu warto poświęcić kilka słów konfiguracji timera TCD5 oraz przerwaniu od przepełnienia licznika, które jest wywoływane 100 razy na sekundę i odpowiada za obsługę klawiatury urządzenia. I właśnie tutaj kryje się mały haczyk, na który i ja dałem się złapać. Otóż, w przypadku mikrokontrolera Xmega, wywołaniu funkcji obsługi przerwania od przepełnienia licznika TCD5 nie towarzyszy automatyczne skasowanie flagi tego przerwania (OVFIF w rejestrze INTFLAGS), jak miało to miejsce w przypadku starszych mikrokontrolerów AVR (rodziny Mega i Tiny). Flagę tę musimy skasować programowo (*TCD5.INTFLAGS = TC5_OVFIF_bm*), w innym wypadku przerwanie od przepełnienia będzie wywoływane non stop, uniemożliwiając w zasadzie poprawne działanie urządzenia. To dość istotna właściwość timerów mikrokontrolera Xmega serii E, którą warto mieć na uwadze.

Ostatnim podsystemem mikrokontrolera, jaki wykorzystuje urządzenie Volta, jest interfejs szeregowej transmisji danych TWI będący odpowiednikiem interfejsu I²C. Interfejs ten jest używany do współpracy z wyświetlaczem OLED o rozdzielczości 128×32 piksele, stanowiącym element graficznego interfejsu użytkownika. Wspomniany interfejs występuje w większości mikrokontrolerów AVR, zarówno tych starszych, jak i najnowszych konstrukcji z rodziny ATXmega, jednak w wykonaniu tych ostatnich został rozbudowany w stosunku do jego pierwszych implementacji oferując dodatkowe funkcjonalności. Przede wszystkim TWI wspiera duże prędkości zegara (aż do 1 MHz), tryb multi-master (z obsługą arbitrażu), możliwość pracy w standardzie SMBus, adresowanie 7- i 10-bitowe, wybudzanie procesora ze stanu uśpienia i wiele, wiele innych. Warto zauważyć, że dokumentacja w tym zakresie jest bardzo obszerna i drobiazgowa, więc kompletny opis interfejsu wykraczałby poza ramy niniejszego artykułu. Co więcej, producent dostarcza gotowy sterownik do obsługi sprzęgu TWI (dość rozbudowany i korzystający z przerwań) oraz notę aplikacyjną o oznaczeniu „AVR1308: Using the XMEGA TWI". My, z racji prostoty urządzenia, posłużymy się elementarnymi funkcjami narzędziowymi wykorzystującymi tzw. *pooling*.

Zaczniemy od funkcji inicjującej interfejs TWI mikrokontrolera Xmega, która przedstawiono na **listingu 6**. Dalej, na **listingu 7** pokazano funkcję odpowiedzialną za wygenerowanie sygnału Start interfejsu TWI i przesłanie adresu układu Slave. Prostą funkcję narzędziową, której zadaniem jest wygenerowanie sygnału Stop magistrali TWI i tym samym zakończenie transmisji danych, pokazano na **listingu 8**. Na **listingach 9 i 10** pokazano kolejne, dwie proste funkcje umożliwiające wysłanie i odebranie bajta danych na magistrali TWI. Funkcja wysyłająca bajt jako rezultat swojego działania zwraca wartość bitu potwierdzenia (ACK) po stronie odbiornika danych (w tym przypadku układu Slave), zaś funkcja pozwalająca na odbiór bajta przyjmuje jako argument wywołania wartość bitu potwierdzenia po stronie odbiornika danych (w tym przypadku układu Master).

Urządzenie wyposażono w niewielki, ale efektowny wyświetlacz OLED. Powodem wybrania tego typu wyświetlacza jest jego doskonała widoczność nawet w świetle słonecznym i bardzo atrakcyjna cena. Zastosowany moduł wykorzystuje panel OLED o przekątnej 0,91" i rozdzielczości 128×32 piksele wyposażony w popularny sterownik ekranu SSD1306 skonfigurowany do pracy jako element sterowany za pomocą magistrali I²C. Jest to dość wygodne

Listing 7. Funkcja odpowiedzialna za wygenerowanie sygnału Start interfejsu TWI i przesłanie adresu układu Slave

```
uint8_t TWIstart(uint8_t slaveAddress){
    //Inicjujemy wygenerowanie sygnału Start
    //i przesłanie adresu układu Slave
    TWIC.MASTER.ADDR = slaveAddress;

    //Czekamy na przesłanie adresu układu Slave
    while(!(TWIC.MASTER.STATUS & (TWI_MASTER_WIF_bm)));

    //Zwracamy NACK, jeśli odebrano sygnał NACK,
    //przegrano arbitraż lub też wystąpił inny błąd magistrali TWI
    if(TWIC.MASTER.STATUS &
    (TWI_MASTER_RXACK_bm|
    TWI_MASTER_ARBLOST_bm|
    TWI_MASTER_BUSERR_bm)) return NACK;
    else return ACK;
}
```

Listing 8. Kod funkcji odpowiedzialnej za wygenerowanie sygnału Stop magistrali TWI i tym samym zakończenie transmisji danych

```
void TWIstop(void) {
    //Inicjujemy wygenerowanie sygnału Stop poprzedzonego NACK
    TWIC.MASTER.CTRLC = TWI_MASTER_ACKACT_bm|TWI_MASTER_CMD_STOP_gc;
}
```

Listing 9. Funkcja odpowiedzialna za wysłanie bajta danych przy użyciu magistrali TWI

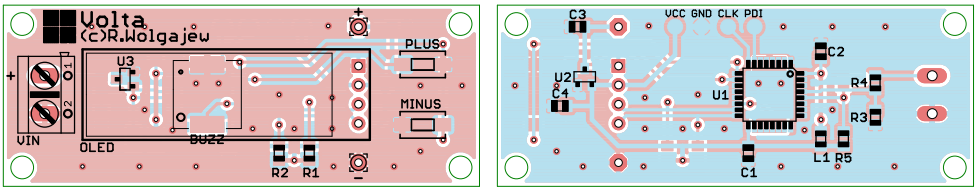
```
uint8_t TWIwriteByte(uint8_t Data) {
    //Inicjujemy przesłanie bajta danych
    TWIC.MASTER.DATA = Data;
    //Czekamy na przesłanie bajta danych
    while(!(TWIC.MASTER.STATUS & (TWI_MASTER_WIF_bm)));
    //Zwracamy NACK, jeśli odebrano sygnał NACK,
    //przegrano arbitraż lub też wystąpił inny błąd magistrali TWI
    if(TWIC.MASTER.STATUS &
    (TWI_MASTER_RXACK_bm|
    TWI_MASTER_ARBLOST_bm|
    TWI_MASTER_BUSERR_bm)) return NACK;
    else return ACK;
}
```

Listing 10. Funkcja odpowiedzialna za odbiór bajta danych przy użyciu magistrali TWI

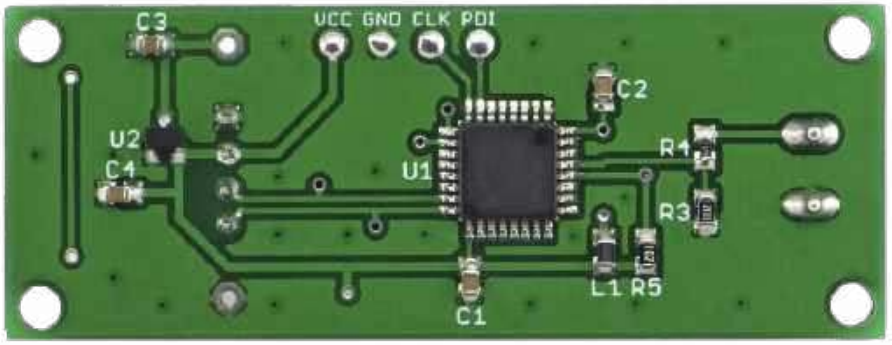
```
uint8_t TWIreadByte(uint8_t ACKNACK) {
    uint8_t Data;
    //Czekamy na odbiór bajta danych
    while(!(TWIC.MASTER.STATUS & TWI_MASTER_RIF_bm));
    //Odczytujemy przesłany bajt danych
    Data = TWIC.MASTER.DATA;
    //Wysyłamy sygnał ACK/NACK
    if (ACKNACK == ACK) TWIC.MASTER.CTRLC = TWI_MASTER_CMD_RECVTRANS_gc;
    return Data;
}
```


eprasa.pl 85168ce91e

rozwiązanie, gdyż wymaga zaangażowania wyłącznie 2 wyprowadzeń mikrokontrolera do przeprowadzenia transmisji z modułem wyświetlacza, lecz niepozbawione wad, gdzie jedną z nich jest niewielka prędkość transmisji wpływająca na częstość odświeżania ekranu. Po szczegóły implementacyjne dotyczące tegoż peryferium odsyłam do mojego artykułu opisującego urządzenie USBtester opublikowanego w EP 05/19, gdzie drobiazgowo opisano zagadnienia programowe związane z obsługą tego rodzaju wyświetlacza OLED.



Rysunek 3. Schemat montażowy urządzenia



Fotografia 1. Zmontowana płytka, widok od strony BOTTOM

Montaż i uruchomienie

Schemat montażowy urządzenia pokazano na **rysunku 3**. Zaprojektowano niewielką, dwustronną płytkę drukowaną, która swoim rozmiarem zbliżona jest do zastosowanego wyświetlacza OLED, udostępniając dodatkowo niezbędne otwory montażowe. Warto również podkreślić, że dla zminimalizowania rozmiaru obwodu drukowanego przewidziano tutaj montaż elementów po obu stronach laminatu. Aplikację urządzenia rozpoczynamy od przylutowania mikrokontrolera (warstwa BOTTOM). Dalej lutujemy pozostałe elementy półprzewodnikowe, potem rezystory i kondensatory oraz inne elementy bierne. Na warstwie TOP montujemy układ U3, następnie buzzer i pozostałe elementy bierne, a na końcu mikroprzełączniki PLUS i MINUS oraz gniazdo podłączeniowe VIN.

Z uwagi na zagęszczenie wyprowadzeń układów scalonych przed pierwszym podłączeniem układu do zasilania należy jeszcze raz sprawdzić jakość wykonanych połączeń, aby nie dopuścić do ewentualnych zwarć. Wspomniana kontrola będzie znacznie łatwiejsza, jeśli zmontowaną płytkę przemyjemy alkoholem izopropylowym w celu wypłukania nadmiaru kalafonii lutowniczej.

Do tak przygotowanej płytki montujemy wyświetlacz OLED, zwyczajnie lutując jego wyprowadzenia w przeznaczone do tego celu pola lutownicze (należy sprawdzić polaryzację zasilania), gdyż połączenia elektryczne zapewniają mu jednocześnie wystarczająco stabilny montaż mechaniczny. Poprawnie zmontowany układ powinien działać zaraz po włączeniu zasilania. Na **fotografii 2** pokazano zmontowane urządzenie od strony BOTTOM.

Obsługa

Po włączeniu zasilania (zaciski +/– na obwodzie drukowanym) urządzenie pracuje w trybie pokazywania wartości mierzonego napięcia (rozdzielczość 20 mV), przy czym ekran w tym trybie odświeżany jest 10 razy na sekundę. Każdorazowe wciśnięcie klawiszy PLUS/MINUS powoduje chwilowe (2 s) przełączenie urządzenia w tryb pokazywania wartości alarmu dla mierzonego napięcia, co symbolizowane jest poprzez wyświetlenie symbolu dzwoneczka po lewej stronie wartości napięcia. W trybie tym krótkie naciśnięcie wspomnianych klawiszy powoduje każdorazową regulację wartości napięcia

Rysunek 4. Wygląd interfejsu użytkownika

alarmowania o 10 mV, długie naciśnięcie o 100 mV, zaś naciśnięcie i przytrzymanie o 1 V. Ustawiona wartość progu alarmowania zapamiętywana jest każdorazowo w nieulotnej pamięci EEPROM mikrokontrolera i wczytywana podczas włączania urządzenia. Przekroczenie ustawionej wartości alarmowania przez mierzone napięcia powoduje generowanie pojedynczych dźwięków poprzez wbudowany buzzer piezoelektryczny.

Podczas włączania urządzenia uruchamiany jest proces autokalibracji przetwornika ADC, w związku z tym nie należy w tym czasie podłączać jakichkolwiek obwodów pomiarowych do wejścia VIN urządzenia. Wygląd graficznego interfejsu użytkownika urządzenia Volta pokazano na **rysunku 4**.

Robert Wołgajew, EP

REKLAMA

ELEKTRONIKA PRAKTYCZNA MATERIAŁY DODATKOWE MEDIA

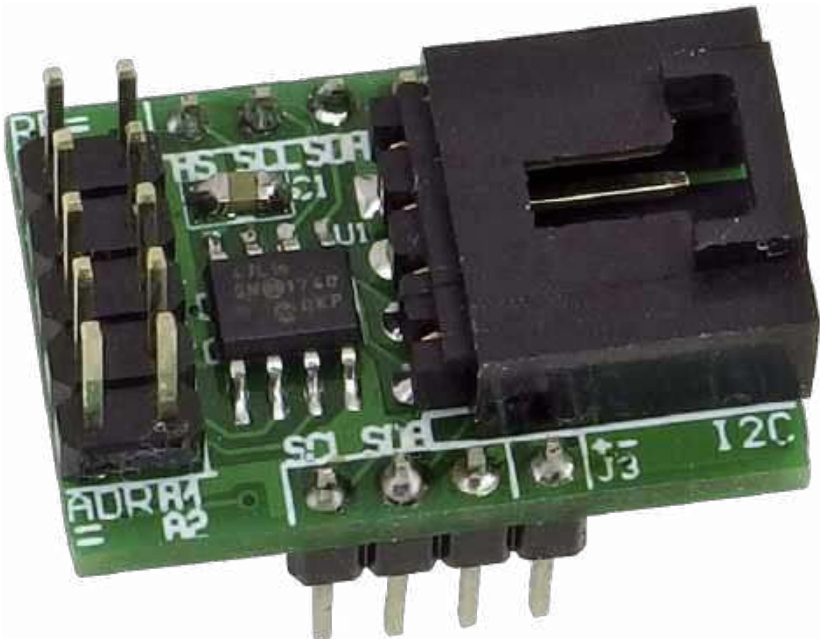
Aby skorzystać z materiałów dodatkowych dołączonych do numeru, należy:

1. Wejść na stronę **www.media.avt.pl**,
2. Zarejestrować się lub zalogować,
3. Wybrać wydanie „Elektroniki Praktycznej", które ma trafić do biblioteki osobistej,
4. Odpowiedzieć na proste pytanie dotyczące bieżącego numeru,
5. Pobrać pliki.

eprasa.pl 85168ce91e

Moduł z pamięcią EERAM

Pamięć EERAM 47xxx firmy Microchip jest kombinacją pamięci SRAM i EEPROM. Pierwsza gwarantuje nieskończoną liczbę cykli oraz krótki czas odczytu i zapisu zawartości, druga służy jako pamięć nieulotna, do której przepisywana jest zawartości pamięci SRAM w przypadku zaniku zasilania.



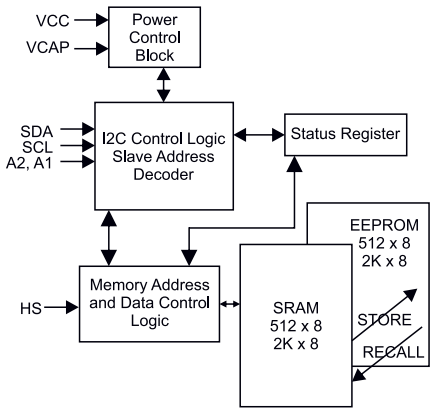
Kopiowanie pamięci SRAM do EEPROM może zostać wymuszone sprzętowo za pomocą wyprowadzenia HS lub poleceniem programowym. Podczas zaniku zasilania układ zasila się z współpracującego kondensatora elektrolitycznego o odpowiednio dobranej pojemności aż do zakończenia cyklu zapisu EEPROM. Minimoduł EERAM wykorzystuje układ 47L16 (16 kb), którego schemat wewnętrzny został pokazany na **rysunku 1**. Dostępny jest też układ o mniejszej pojemności 47L04 (4 kb). Seria 47Lxx przystosowana jest do pracy z napięciem 2,7...3,3 V, seria 47Cxx z napięciem 4,5...5,5 V i jest zgodna wyprowadzeniami. Wszystkie układy mają szeregowy interfejs I²C. Wyprowadzenia adresowe A1 i A2 umożliwiają współpracę do 4 układów 47xxx na jednej magistrali. Pamięci 47xxx mają możliwość programowej ochrony przed zmianą zawartości wybranego bloku lub całej pamięci.

W wielu aplikacjach hybrydowa pamięć wykazuje zalety w porównaniu z Flash, EEPROM lub FRAM, niestety nie jest z nimi zgodna wyprowadzeniami, co utrudnia ewentualną podmianę w istniejącej aplikacji.

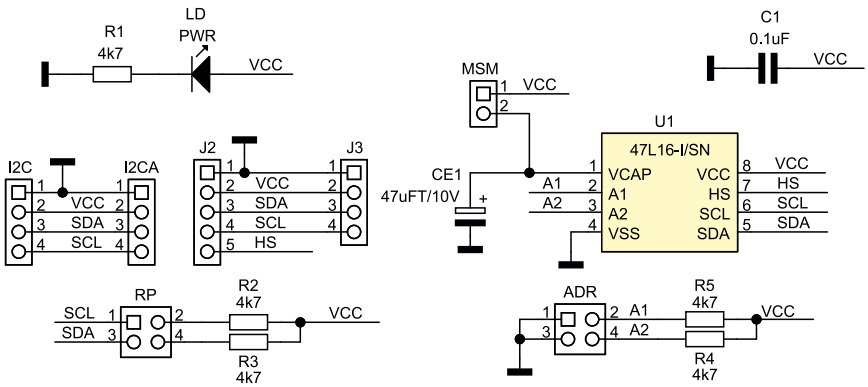
Budowa i działanie

Schemat minimodułu pokazano na **rysunku 2**. Moduł komunikuje się poprzez magistralę I²C doprowadzoną do złącza I²C typu EH2.54 lub I2CA typu JST 1 mm, co ułatwia połączenie z różnymi systemami uruchomieniowymi. Magistrala powielona jest na złączach J2 i J3. W zależności od zastosowanego układu U1, 47Lxx lub 47Cxx możliwe jest zasilanie 3,3 V przy współpracy z Raspberry czy STM32 lub 5 V z Arduino. Dioda LD sygnalizuje obecność zasilania.

Rezystory R2 i R3 podciągają magistralę I²C, podciąganie można wyłączyć, usuwając zwory RP (wyprowadzenia 1–2, 3–4). Ustawienie adresu bazowego 0x50...0x56 możliwe jest zworami ADR (wyprowadzenia 1–2, 3–4). Układ 47xxx zawiera dodatkowe wyprowadzenie HS aktywne stanem wysokim, które odpowiada za wyzwolenie procesu kopiowania pamięci SRAM do EEPROM. Gdy nie jest wykorzystane, może pozostać niepodłączone, gdyż ma wbudowany układ podciągający do masy.



Rysunek 1. Schemat wewnętrzny EERAM (za notą firmy Microchip)



Rysunek 2. Schemat modułu EERAM

Dodatkowe materiały do pobrania ze strony www.media.avt.pl

W ofercie AVT* AVT-5818

Podstawowe parametry:
- pamięć o nieskończonej liczbie cykli oraz krótkim czasie odczytu i zapisu,
- komunikacja poprzez interfejs I²C,
- pojemność pamięci 4 kb,
- możliwość ustawienia adresu bazowego z zakresu 0x50…0x56.

Wykaz elementów:

Rezystory:
R1…R5: 4,7 kΩ SMD0805 1%

Kondensatory:
C1: 0,1 µF SMD0805
CE1: 47 µF/10 V SMD3528 tantalowy B

Półprzewodniki:
LD: LED SMD0805
U1: 47L16-I/SN (SO8)

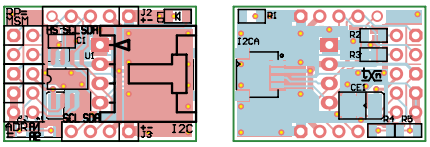
Pozostałe:
ADR, MSM, RP: goldpin 2×5 2,54 mm + zwory
I2C: złącze EH4 kątowe
I2CA: złącze JST4 1 mm
J2: złącze SIP5 2,54 mm
J3: złącze SIP4 2,54 mm

*** 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 *http://sklep.avt.pl*, osoby zainteresowane zakupem płytek drukowanych (PCB) prosimy o kontakt via e-mail: kity@avt.pl.

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 3. Schemat płytki PCB wraz z rozmieszczeniem elementów

Kondensator CE1 podłączony do wyprowadzenia VCAP odpowiada za podtrzymanie zasilania U1 podczas zaniku napięcia, aż do zakończenia przenoszenia zawartości SRAM do EEPROM w trybie automatycznym Auto-Store. Kondensator jest ładowany poprzez wewnętrzne obwody U1. Gdy napięcie na kondensatorze jest zbyt niskie i wynosi odpowiednio 2,6 V dla 47Lxx lub 4,4 V dla 47Cxx, operacje na pamięci są blokowane. Auto-Store to podstawowy i wygodny tryb pracy EERAM. Jeżeli funkcja nie jest używana, należy zewrzeć zworę MSM i wymuszać zapis programowy lub za pomocą pinu HS. Przywracanie zawartości EEPROM do SRAM odbywa się każdorazowo automatycznie po włączeniu zasilania układu lub możne zostać wymuszone programowo.

Montaż i uruchomienie

Moduł zmontowany jest na dwustronnej płytce drukowanej. Rozmieszczenie elementów pokazano na **rysunku 3.** Sposób montażu jest klasyczny i nie wymaga opisu.

Konstrukcja mechaniczna modułu umożliwia bezproblemową współpracę z płytkami stykowymi lub prototypowymi, zalecam stosowanie długich (30...40 mm) złączy SIP, wlutowanych tak, aby wyprowadzenia wystawały po obu stronach płytki drukowanej. Taki sposób montażu umożliwia wygodne dołączenie do płytek stykowych oraz ułatwia wyprowadzenie sygnałów oraz rozszerzanie magistrali I²C.

Dla szybkiego sprawdzenia działania moduł można podłączyć do magistrali I²C Raspberry Pi (47Lxx) ze zdjętą zworą MSM (tryb automatyczny). Przy wykorzystaniu biblioteki *i2ctools*, po ustawieniu adresu bazowego zworami A2 i A1 (domyślnie A2, A1=ON=LL, 0x50) moduł powinien być widoczny po odczycie magistrali poleceniem:

```
i2cdetect -y 1
```

W odróżnieniu od typowej pamięci EEPROM na magistrali pojawią się dwa urządzenia. Pod adresem 0x50 jest właściwa matryca pamięci EERAM, a pod adresem 0x18 jej rejestry konfiguracyjne. Przy zmienionej zworami ADR adresacji widoczne adresy zostaną przesunięte na wartość odpowiednio 0x50...0x56 i 0x18...0x1A. Samo korzystanie z pamięci EERAM odbywa się identycznie jak w przypadku EEPROM. 47xxx adresowany jest 16-bitowo, a cykl odczytu i zapisu może odbywać się bajtowo lub blokowo (sekwencyjnie).

Znaczenie bitów rejestrów konfiguracyjnych opisuje **tabela 1**. Rejestry dostępne są pod dwoma subadresami 0x00 dla STATUS (zapis/odczyt) i 0x55 dla COMMAND (tylko zapis).

Tabela 1. Bity konfiguracyjne układu 47xxx

Rejestr	Adres	Bit7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
STATUS	00h	AM	—	—	BP2	BP1	BP0	ASE	EVENT
COMMAND	55h	CMD7	CMD6	CMD5	CMD4	CMD3	CMD2	CMD1	CMD0

Tabela 2. Znaczenie bitów zabezpieczających B2, B1, B0

Zabezpieczony blok	BP2	BP1	BP0	47X04	47X16
brak zabezpieczenia	0	0	0	—	—
górne 1/64	0	0	1	1F8h...1FFh	7E0h...7FFh
górne 1/32	0	1	0	1F0h...1FFh	7C0h...7FFh
górne 1/16	0	1	1	1E0h...1FFh	780h...7FFh
górne 1/8	1	0	0	1C0h...1FFh	700h...7FFh
górne 1/4	1	0	1	180h...1FFh	600h...7FFh
górne 1/2	1	1	0	100h...1FFh	400h...7FFh
cała pamięć	1	1	1	000h...1FFh	000h...7FFh

Konfiguracja trybu pracy układu 47xxx odbywa się poprzez zapis rejestru STATUS (0x18/0x00):

- B7: AM, bit ustawiony jest, gdy nastąpiła zmiana zawartości SRAM od ostatniego cyklu zapisu EEPROM, jeżeli jest ustawiony (1) informuje o różnicy zawartości SRAM i EEPROM;
- B6, B5: nieużywane, B65=00;
- B4 B3, B2: BP2, 1, 0, bity odpowiadające za blokadę zapisu bloku lub całej pamięci zgodnie z **tabelą 2;**
- B1: ASE, aktywacja trybu zapisu automatycznego, po ustawieniu ASE=1 układ pracuje w trybie automatycznego zapisu SRAM do EEPROM po zaniku zasilania;
- B0: EVENT, informuje stanem wysokim o aktywności wyprowadzenia HS.

Bity B4...0 są nieulotne.

Rejestr COMMAND służy do programowej inicjacji zapisu SRAM do EEPROM i obsługuje tylko dwie komendy: 0x33 inicjuje zapis SRAM do EEPROM (Software Store), 0xDD inicjuje odczyt EEPROM do SRAM (Software Recal). W pierwszej kolejności zapisujemy rejestr STATUS, ustawiając tryb automatyczny, bez ochrony pamięci przed zapisem poleceniem:

```
i2cset -y 1 0x18 0x02
```

Poprawność ustawienia możemy sprawdzić poleceniem:

```
i2cget -y 1 0x18 0x00
```

Przykładowy odczyt zawartości komórki 0x0F, EERAM wykonujemy dwoma poleceniami. Pierwsze ustawia adres 16-bitowy (*i2ctools* nie obsługuje bezpośrednio tego trybu adresowania i konieczne jest małe obejście):

```
i2cset -y 1 0x50 0x00 0x0F
```

Drugie jest właściwym odczytem z 16-bitowego adresu:

```
i2cget -y 1 0x50
```

Przykładowy zapis zawartości komórki 0x0F wartością 0x55 wykonujemy poleceniem:

```
i2cset -y 1 0x50 0x00 0x0F 0x55 i
```

Weryfikacje zapisu wykonujemy poleceniami:

```
i2cset -y 1 0x50 0x00 0x0F
i2cget -y 1 0x50
```

Powinna zostać zwrócona zapisana wartość 0x55, a w rejestrze STATUS ustawiony bit AM(B8) informujący o różnicy zawartości SRAM/EEPROM:

```
i2cget -y 1 0x18
0x82
```

Teraz możemy odłączyć zasilanie modułu i po ponownym podłączeniu sprawdzić zawartość rejestru STATUS i ustawienie AM=0, co świadczy o prawidłowym skopiowaniu wartości:

```
i2cget -y 1 0x18
0x02
```

Zweryfikujmy zawartość komórki 0x0F:

```
i2cset -y 1 0x50 0x00 0x0F
i2cget -y 1 0x50
```

Powinna zostać zwrócona zapisana wcześniej wartość 0x55.

Jeżeli wszystko działa poprawnie, można moduł zastosować we własnej aplikacji, sprawdzając działanie blokady zapisu oraz tryb programowy. Pozostałe informacje o pamięciach EERAM można znaleźć w karcie katalogowej 47xxx oraz nocie AN2047 udostępnionej przez firmę Microchip.

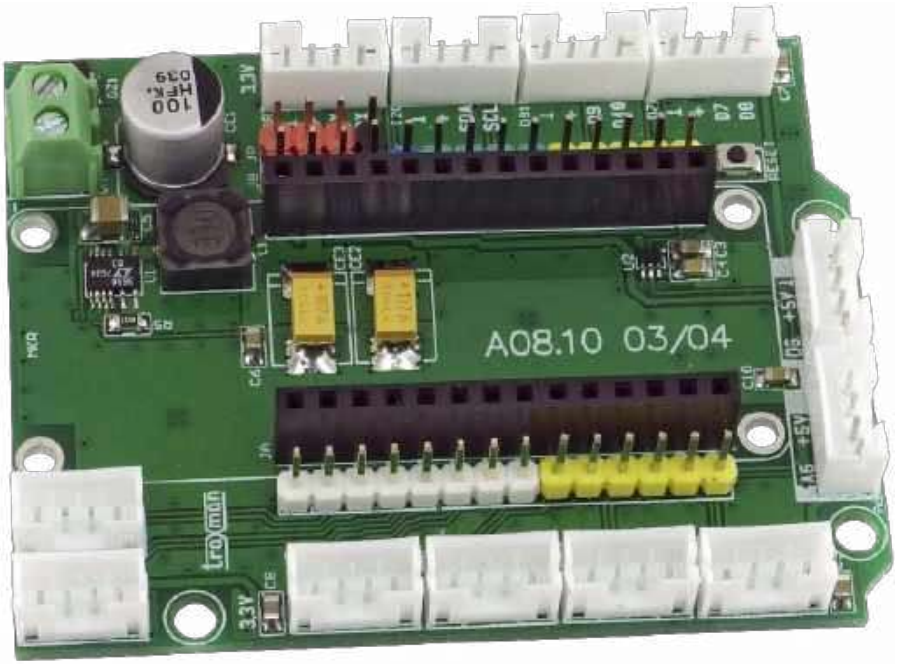
Adam Tatuś
adam.tatus@ep.com.pl

REKLAMA

eprasa.pl 85168ce91e

Płytka bazowa dla Arduino MKR

Zaprezentowana płytka ułatwia szybkie połączenie Arduino MKR z czujnikami lub elementami wykonawczymi oraz zapewnia odpowiednie parametry zasilania.



Dodatkowe materiały do pobrania ze strony www.media.avt.pl

W ofercie AVT* AVT-5819

Podstawowe parametry:
- szereg złączy typu JST PH4 2,00 mm do łatwego dołączana peryferiów,
- jedna linia analogowa i jedna cyfrowa przystosowane do sygnałów o napięciu 5 V,
- wydajność prądowa bloku zasilania wynosi 400 mA,
- zasilanie napięciem stałym z zakresu 6…30 V.

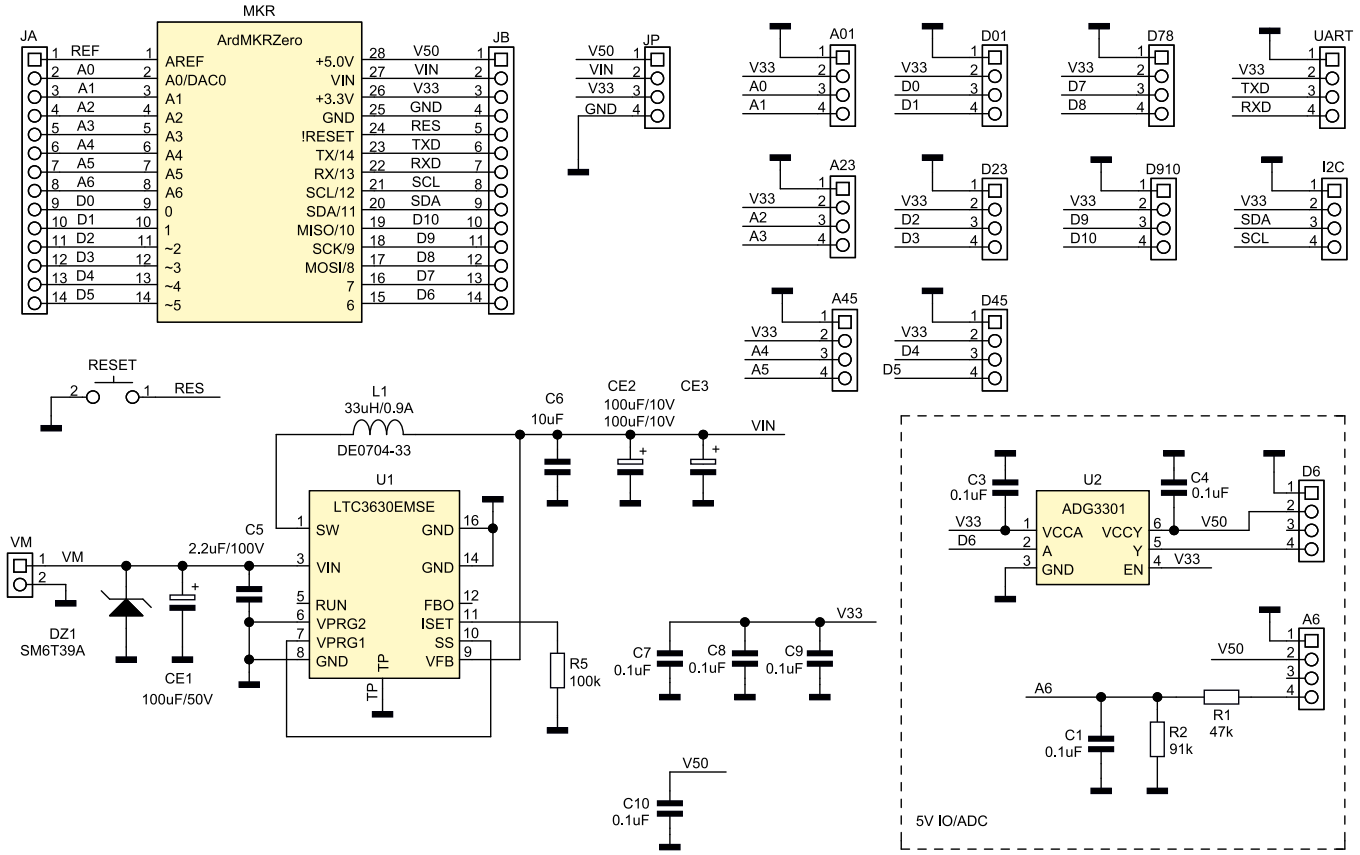
*** Uwaga! Elektroniczne zestawy do samodzielnego montażu. Wymagana umiejętność lutowania!**
Podstawową wersją zestawu jest wersja [B] nazywana potocznie KIT-em (z ang. zestaw). Zestaw w wersji [B] zawiera elementy elektroniczne (w tym [UK] – jeśli występuje w projekcie), które należy samodzielnie wlutować 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 *http://sklep.avt.pl*, osoby zainteresowane zakupem płytek drukowanych (PCB) prosimy o kontakt via e-mail: kity@avt.pl.

Na złącza JA i JB wyprowadzone są sygnały z płytki MKR Zero, złącze JP dubluje sygnały zasilania VIN, V50, V33. Do złączy czujników typu JST PH4 2,00 mm doprowadzone są wszystkie sygnały z MKR, które dodatkowo uzupełnione są o zasilanie 3,3 V.

Należy pamiętać, że płytki MKR mają wyprowadzenia IO zgodne ze standardem 3,3 V, podłączenie do nich czujników z wyjściem 5 V uszkodzi procesor. W związku z tym na płytce przewidziano opcjonalny obwód umożliwiający współpracę MKR z systemami 5 V wyróżniony na schemacie ramką. Układ U2 typu ADG3301 jest dwukierunkowym konwerterem poziomów napięć dla wyprowadzenia 6. Elementy R1, R2 i C1



Rysunek 1. Schemat płytki bazowej

eprasa.pl 85168ce91e

Wykaz elementów:

Rezystory: (SMD0805, 1%)
R1: 47 kΩ
R2: 91 kΩ
R5: 180 kΩ (uwagi w tekście)

Kondensatory:
C1, C3, C4, C7…C10: 0,1 µF SMD0805 ceramiczny X7R
C5: 2,2 µF/100 V SMD1210 ceramiczny X7R
C6: 10 µF SMD0805 ceramiczny X7R
CE1: 100 µF/50 V elektrolityczny SMD
CE2, CE3: 100 µF/10 V tantalowy SMC

Półprzewodniki:
DZ1: transil SM6T39A SMB_D
U1: LTC3630EMSE (MSOP16E_050_TP)
U2: ADG3301-BKSZ (SC70-6)

Pozostałe:
L1: DE0704-33 33 µH/0,9 A DE0703 dławik mocy SMD
RESET: mikroprzełącznik SMD
A01, A6, A23, A45, D01, D6, D23, D45, D78, D910, I2C, UART: złącze JST 2 mm 4 pin
JA, JB, JP: złącze szpilkowe 2,54 mm
ArdMKRZero: złącze żeńskie 2,54 mm
VM: złącze śrubowe DG381-3.5-2

to dzielnik napięcia z 5 V na 3,3 V połączony z wyprowadzeniem A6. Sygnały 6 i A6 doprowadzone są na płytce do wyróżnionych złączy D6, A6. Do złączy tych doprowadzone jest także napięcie V50 z płytki MKR. Gdy układ zasilany będzie tylko z akumulatora podłączonego do MKR Zero, napięcie V50 nie jest dostarczane i złącza A6, D6 nie powinny być wykorzystywane.

Budowa i działanie

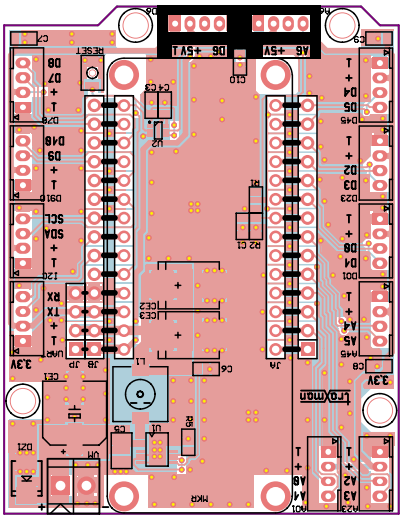
Schemat modułu został pokazany na **rysunku 1**. Płytka bazowa zasilana jest poprzez złącze śrubowe VM napięciem stałym z zakresu 6...30 V. Blok zasilania składa się z przetwornicy obniżającej U1 typu LTC3630, która zawiera w swej strukturze wszystkie elementy mocy. Napięcie wyjściowe przetwornicy, oznaczone VIN, ustalane jest stanem wyprowadzeń VPRG1 i VPROG2 i w modelu wynosi 5 V. Rezystor R5 ogranicza maksymalny prąd dławika L1 oraz prąd obciążenia do wartości ok. 400 mA. Zapewnia to maksymalną moc uruchamianych układów na poziomie 2 W.

W przypadku wykorzystania wbudowanej w płytkę MKR Zero ładowarki akumulatora należy pamiętać o sumarycznym bilansie prądu do zasilania podłączonych czujników. W MKR Zero prąd ładowania jest dosyć duży, wynosi 350 mA. Można go zmniejszyć, zmieniając wartość rezystora R3 (na płytce MKR Zero) na 10 kΩ, co ograniczy wartość do 100 mA i przy okazji umożliwi bezpieczne stosowanie akumulatorów o mniejszych pojemnościach.

UWAGA: Gdy aplikacja zasilana będzie tylko z akumulatora podłączonego do płytki MKR Zero, nie należy lutować układu U2, który pozbawiony zasilania V50 będzie niepotrzebnie obciążał akumulator.

Montaż i uruchomienie

Układ zmontowany jest na niewielkiej dwustronnej płytce drukowanej, schemat płytki PCB wraz z rozmieszczeniem elementów zostało pokazane na **rysunku 2**. Montaż wykonujemy zgodnie z ogólnymi zasadami, należy tylko dokładnie sprawdzić poprawność przylutowania pada termicznego układu U1.



Rysunek 2. Schemat płytki PCB wraz z rozmieszczeniem elementów

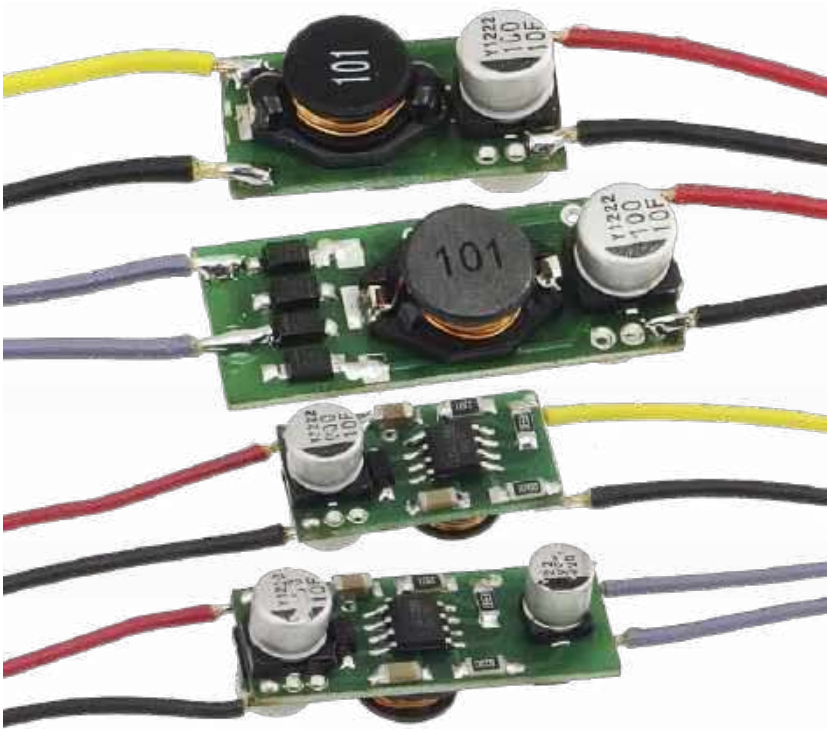
Warto wyróżnić grupy sygnałów zasilania, wejść analogowych, cyfrowych oraz transmisji różnokolorowymi listwami kołkowymi, ułatwia to szybkie i bezbłędne połączenia ze współpracującymi układami. Zamiennie ze złączami PH 2.00 mm mogą być stosowane złącza typu 110990030 zgodne z płytkami Grove.

Zmontowany moduł pokazuje fotografia tytułowa. Po podłączeniu źródła zasilania do złącza VM należy tylko sprawdzić obecność napięcia VIN, które powinno wynosić 5 V ±5%.

Adam Tatuś
adam.tatus@ep.com.pl

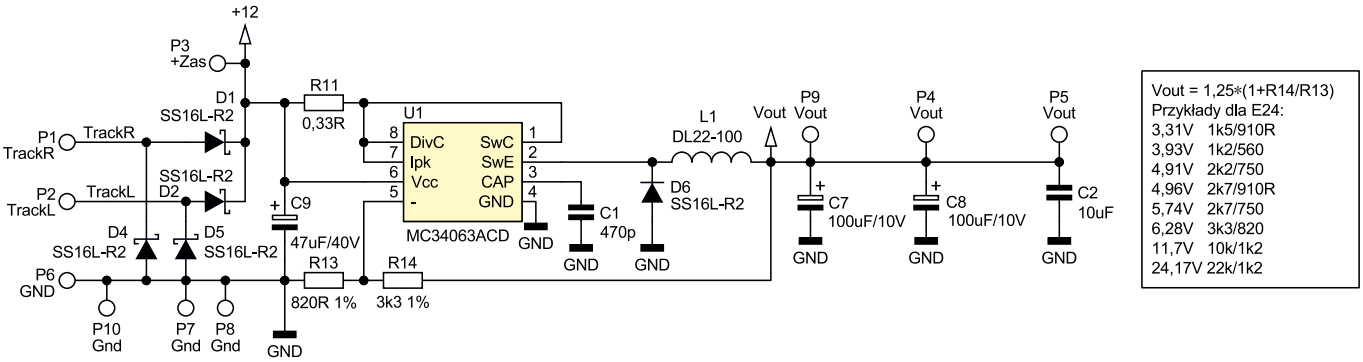
Miniaturowy stabilizator impulsowy

Moduł został zaprojektowany do zasilania serwomechanizmów w modelach kolejowych sterowanych systemem DCC. Kluczowym założeniem było uzyskanie możliwie małego układu. Stabilizator może być użyteczny tam, gdzie małe wymiary mają kluczowe znaczenie.



Przy obniżaniu napięcia, gdy różnica pomiędzy napięciem wejściowym a wyjściowym jest duża, stabilizatory liniowe generują znaczne straty mocy. Konieczne jest stosowanie dużych radiatorów, co podwyższa koszt i wymiary gotowego zasilacza. Przykładowo, przy prądzie 500 mA, zasilaniu 24 V i napięciu wyjściowym 4 V konieczne jest oddanie 10 W mocy, co wymaga pokaźnego radiatora. Sprawność takiego układu wynosi zaledwie ok. 16%. W przypadku stabilizatora impulsowego, przy sprawności na poziomie 80...90%, nie tylko zmniejsza się tracona moc, ale także prąd pobierany ze źródła. W tym konkretnym

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 1. Schemat układu

Fotografia 1. Układ zamontowany w wagonie z drzwiami odsuwanymi serwomechanizmem

przypadku spadnie do około 110...120 mA zależnie od sprawności stabilizatora.

Dodatkowe materiały do pobrania ze strony www.media.avt.pl

W ofercie AVT* AVT-5821

Podstawowe parametry:
- niewielkie wymiary,
- napięcie wyjściowe ustawiane wartościami rezystorów,
- obciążenie prądem do 500 mA.

Wykaz elementów:

Rezystory:
R11: 0,33 Ω SMD1206
R13, R14: patrz schemat

Kondensatory:
C2: 10 μF/10 tantalowy (pojemność i napięcie zależy od wymagań)
C7, C8: 100 μF/10 V (pojemność i napięcie zależy od wymagań)
C9: 47 μF/40 V – patrz tekst

Półprzewodniki:
U1: MC34063ACD
D1, D2, D4, D6: SS16L-R2

*** 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

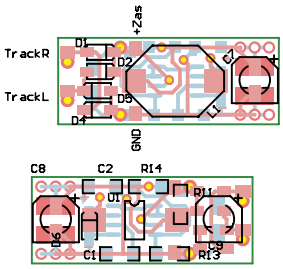
Nie każdy zestaw AVT występuje we wszystkich wersjach! Każda wersja ma załączony ten sam plik pdf! Podczas składania zamówienia upewnij się, którą wersję zamawiasz!
http://sklep.avt.pl. W przypadku braku dostępności na *http://sklep.avt.pl*, osoby zainteresowane zakupem płytek drukowanych (PCB) prosimy o kontakt via e-mail: kity@avt.pl.

Budowa i działanie

Układ stabilizatora jest typową aplikacją MC34063 (**rysunek 1**). Nie jest to najwydajniejszy stabilizator, ale bardzo popularny i tani. Bez dodatkowych elementów potrafi dostarczyć do obciążenia prąd 500 mA. Napięcie wyjściowe ustalają elementy R13 i R14. Rezystor R11 ogranicza prąd wyjściowy do wartości 500 mA, wartości bezpiecznej dla układu U1.

Uwagę mogą zwrócić wartości kondensatorów wejściowego i wyjściowych. Jak już było napisane, duży nacisk położono na wymiary PCB. Z tego powodu kondensatory wyjściowe mają małą wartość. W przypadku konieczności pobierania większego prądu należy dolutować dodatkowy kondensator na wyjściu. W tym celu na wyjściu przewidziano dodatkowe miejsce na wlutowanie elementu THT. Mała pojemność wejściowa C9 wynika z tego, że wejściowe napięcie zmienne systemu DCC ma kształt prostokąta. W przypadku zasilania napięciem sinusoidalnym należy dolutować zewnętrzny kondensator. Do tego celu na płytce przewidziano stosowne pola lutownicze.

Użycie diod Schottky'ego w mostku prostowniczym nie jest przypadkowe. Sygnał DCC ma częstotliwości ok. 10 kHz i popularne diody prostownicze pracują na granicy swych możliwości.



Rysunek 2. Schemat płytki PCB wraz z rozmieszczeniem elementów

Montaż i uruchomienie

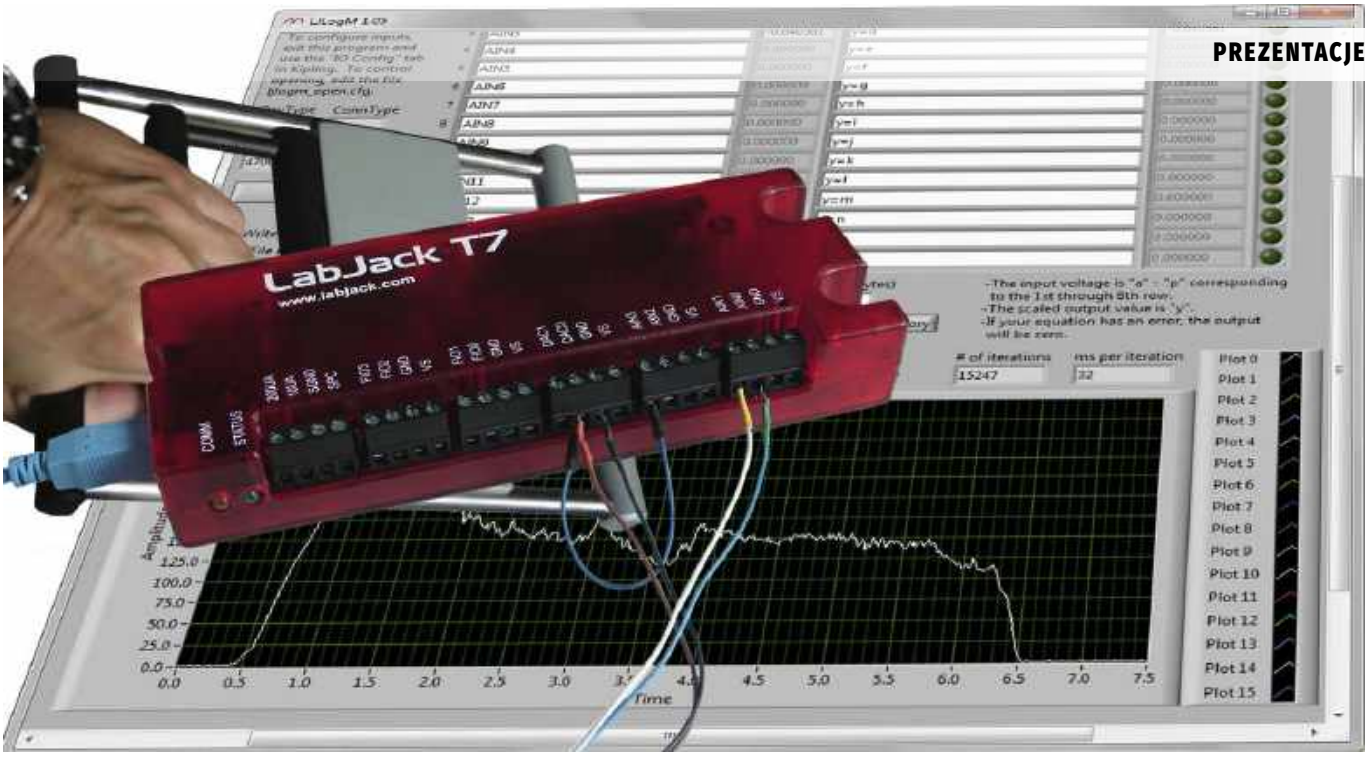
Schemat płytki został pokazany na **rysunku 2**. Zmontowany stabilizator pokazuje fotografia tytułowa, natomiast **fotografia 1** układ zamontowany w wagonie z drzwiami odsuwanymi serwomechanizmem. Płytka stabilizatora znajduje się z lewej strony i jest umieszczona pionowo. PCB po prawej stronie to dekoder dźwiękowy w wykonaniu homemade. W niewidocznej części po prawej znajduje się kondensator UPS z układem „łagodnego" ładowania i „diodą idealną" zbudowaną na tranzystorze MOSFET.

Wymiary płytki można zmniejszyć przez odcięcie diod mostka prostowniczego. W takiej sytuacji stabilizator zasilany jest z napięcia dostępnego w dekoderze DCC.

EP, Sas
sas@elportal.pl

http://www.ep.com.pl

eprasa.pl 85168ce91e



Systemy akwizycji danych LabJack

Bardzo często zachodzi konieczność szybkiego i względnie taniego wdrożenia systemu akwizycji danych pomiarowych. Niestety, przy projektowaniu takiego systemu nie zawsze możliwe jest określenie pełnych wymagań. Zwłaszcza że zwykle rosną one w trakcie użytkowania. Ważną cechą systemu jest więc możliwość jego łatwej rekonfiguracji. Rozwiązaniem wartym polecenia w takich sytuacjach są moduły akwizycji danych amerykańskiej firmy LabJack.

Więcej informacji:
Egmont Instruments
ul. Marszałkowska 136/31, 00-004 Warszawa
tel. 22 850 62 05-07, 692 50 17 50
labjack@egmont.com.pl, www.egmont.com.pl

LabJack od wielu lat rozwija kompaktowe systemy akwizycji danych, oferując jednocześnie bogatą gamę akcesoriów. Rodzina składa się z kompletnych systemów akwizycji (DAQ), w której poszczególne modele różnią się m.in. liczbą wejść i wyjść analogowych i cyfrowych, typami wejść analogowych, maksymalną i efektywną rozdzielczością oraz częstotliwością próbkowania, a także liczbą wewnętrznych liczników/układów czasowych, portami komunikacyjnymi czy wbudowanym zegarem czasu rzeczywistego. Do rodziny LabJack należą modele: U3-LV, U3-HV, U6, U6-Pro, UE9, UE9-Pro, U12, T4, T7 i T7-Pro. Ważną cechą modeli T4, T7 i T7-Pro jest możliwość obsługiwania ich za pośrednictwem skryptów pisanych przez użytkowników. Skrypty te są zapisywane w pamięci Flash modułu i są uruchamiane w trybie stand-alone w chwili włączenia zasilania. Tym samym moduł staje się autonomicznym systemem akwizycji danych. Urządzenia DAQ T7-Pro oprócz portów USB i Ethernet komunikują się z hostem bezprzewodowo za pośrednictwem interfejsu Wi-Fi.

Niekwestionowaną zaletą modułów LabJack jest oprogramowanie udostępniane na forum użytkowników. Projektanci systemów w wielu przypadkach mogą znaleźć niemal gotowe rozwiązanie danego problemu, pozyskiwane za darmo lub za niewielką opłatą. Podobnie jest z dokumentacją i praktycznymi poradami użytkowników, prezentowanymi na forum. Ich obfitość jest wielką zaletą, ale też nieraz trzeba poświęcić trochę czasu, aby przeszukać wiele dokumentów, zanim dotrze się do odpowiedniego rozwiązania.

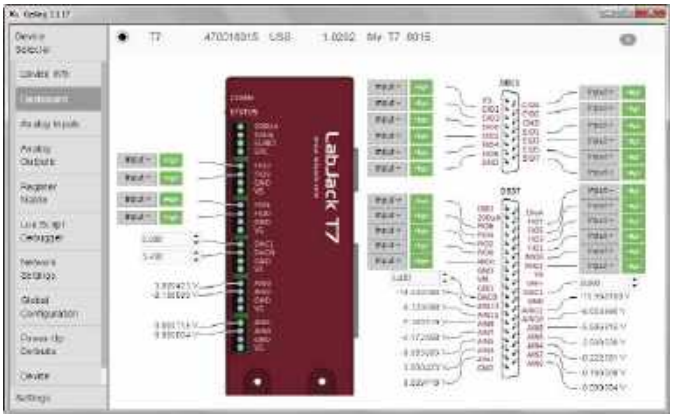
Uniwersalność

Można zaryzykować twierdzenie, że za pomocą modułów DAQ oferowanych przez LabJack można rozwiązać większość typowych problemów związanych z akwizycją i analizą danych pomiarowych.

Fotografia 1. Złącza komunikacyjne modułu LabJack T7

eprasa.pl 85168ce91e

Fotografia 2. Rozbudowę systemu ułatwiają moduły rozszerzające



Rysunek 1. Ekran „Dashboard" programu Kipling

Dostępne moduły rozszerzające, takie jak: dokładne źródła referencyjne, wzmacniacze pomiarowe, przełączniki mocy, translatory poziomów sygnałów cyfrowych, bufory we/wy, multipleksery sygnałów analogowych i wiele innych, zwiększają standardową funkcjonalność każdego DAQ-a. Rodzina urządzeń została zaprojektowana tak, aby możliwa była niemal dowolna rozbudowa systemu pomiarowego. Dotyczy to zarówno samego łączenia różnych typów modułów DAQ, jak i ich rozszerzeń.

Każdy DAQ dysponuje wewnętrznymi zasobami, których liczba i rodzaje zależą od danego modelu. Przykładowo LabJack T7 zawiera: 14 pojedynczych wejść/wyjść analogowych o rozdzielczości od 16 do 18 bitów (parametr zależny od szybkości akwizycji, wejścia mogą być łączone w 7 par różnicowych), można również używać ich w trybie wzmacniaczy pomiarowych o wzmocnieniu ×1, ×10, ×100 i ×1000, uzyskując zakresy ±10, ±1, ±0,1 i ±0,01 woltów, 2 wyjścia analogowe o rozdzielczości 12 bitów i zakresie 0...5 V, 23 wejścia/wyjścia cyfrowe wykorzystywane również do obsługi interfejsów SPI, I²C i asynchronicznego portu szeregowego.

Podczas pracy w trybie stream osiągana jest częstotliwość próbkowania danych do 100 kHz zależna jednak od rozdzielczości. W trybie wydawania poleceń czas odpowiedzi nie przekracza 1 milisekundy. Do zasobów DAQ-a zaliczają się ponadto układy czasowe/liczniki, które mogą być użyte do implementacji wyjść PWM (1...32 bitów). Sprzętowe liczniki modułów T7 mogą zliczać impulsy o częstotliwości do ok. 40 MHz, ich programowa implementacja pozwala na pracę do 200 kHz. Układy czasowe są często używane do realizacji funkcji debounce. Urządzenia zawierają ponadto watchdog i wbudowany czujnik temperatury. Zewnętrzne rezystancyjne czujniki różnych wielkości mogą być zasilane również wbudowanymi źródłami prądowymi o wydajności 200 µA i 10 µA.

Użytkownicy piszący własne skrypty dla modułów LabJack mają dostęp do zasobów poprzez rejestry. W komunikacji z otoczeniem używany jest protokół Modbus TCP, niezależnie od interfejsu (USB, Ethernet czy Wi-Fi). Mapowanie rejestrów jest zgodne z tym protokołem, ale wysokopoziomowa biblioteka LJM pozwala odwoływać się do rejestrów również przez ich nazwy, np. „AIN0".

Software

LabJack dostarcza darmowe oprogramowanie, za pomocą którego można w ciągu kilku minut skonfigurować dowolny moduł DAQ, a nawet zbudować układ pomiarowy. Podstawowym programem służącym do konfigurowania modułu jest Kipling (**rysunek 1**). Konfiguracja może być zapamiętywana w pamięci nieulotnej DAQ-a i wykorzystywana później np. w trybie stand-alone. Najprostszą metodą zbudowania prostego układu pomiarowego jest użycie programu LJLogM, w którym można nie tylko odczytywać dane cyfrowe z DAQ-a, ale też przedstawiać je w postaci wykresów. Dużo bardziej zaawansowany program DAQFactory może posłużyć nawet do sterowania procesem przemysłowym.

Przykład aplikacji – pomiar siły ścisku dłoni

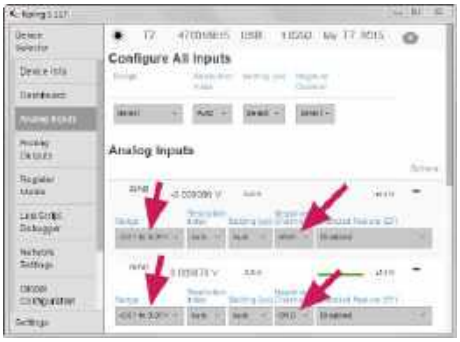
Aby pokazać, jak łatwe jest stworzenie użytkowej aplikacji z modułami LabJack, zaprojektujemy system pomiaru siły za pomocą dynamometru ręcznego. Równie proste w implementacji mogą być także inne podobne zagadnienia. W opisywanym przykładzie siła jest mierzona czujnikiem tensometrycznym pracującym w konfiguracji pełnego mostka. Kolejne etapy projektu to: konfiguracja modułu, kalibracja układu pomiarowego i graficzne zobrazowanie wyników w darmowym programie LJlogM dostarczanym przez LabJack.

Mostek może być zasilany z systemowego źródła napięcia +5 V – „VS". W wielu zastosowaniach takie rozwiązanie jest w pełni wystarczające, ale ze względu na możliwość występowania w napięciu VS zakłóceń, a także dopuszczalnej jego niestabilności, można również skorzystać ze źródła referencyjnego o regulowanym napięciu np. „DAC0". Obciążalność tego wyjścia jest równa 20 mA, więc dla mostka 350-omowego dopuszczalny prąd nie powinien być przekroczony nawet dla maksymalnego napięcia 5 V. W aplikacjach wymagających dużej dokładności i powtarzalności można zastosować dodatkowy zewnętrzny moduł rozszerzający zawierający precyzyjne źródło referencyjne.

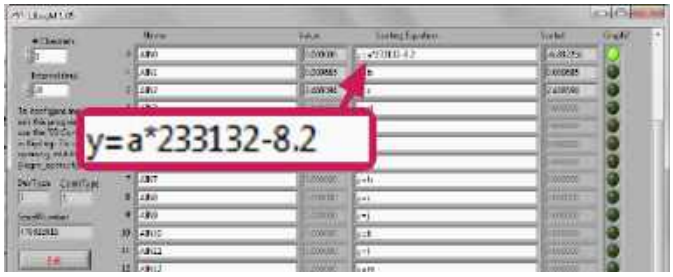
W przyjętym rozwiązaniu napięcie referencyjne „DAC0" ustawiono na 3,5 V. Kolejnym krokiem konfigurowania DAQ-a jest połączenie wejść AIN0 i AIN1 w tryb wejścia różnicowego, co wykonano w programie Kipling (**rysunek 2**). Czujniki tensometryczne dostarczają bardzo niskich napięć wyjściowych. Są one na poziomie kilku

Fotografia 3. Urządzenie LabJack T7 w wersji Pro może komunikować się poprzez Wi-Fi

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 2. Ekran konfiguracyjny programu Kipling



Rysunek 3. Formuła używana do pomiarów siły za pomocą dynamometru i modułu LabJack T7

miliwoltów dla pełnego zakresu. Konieczne jest zatem wybranie największego wzmocnienia, czyli najniższego zakresu pomiarowego: 0,01 V. Prace konfiguracyjne kończą się na zaznaczeniu opcji powodującej przyjęcie tej konfiguracji jako domyślnej, a więc odtwarzanej po włączeniu zasilania modułu lub po restarcie.

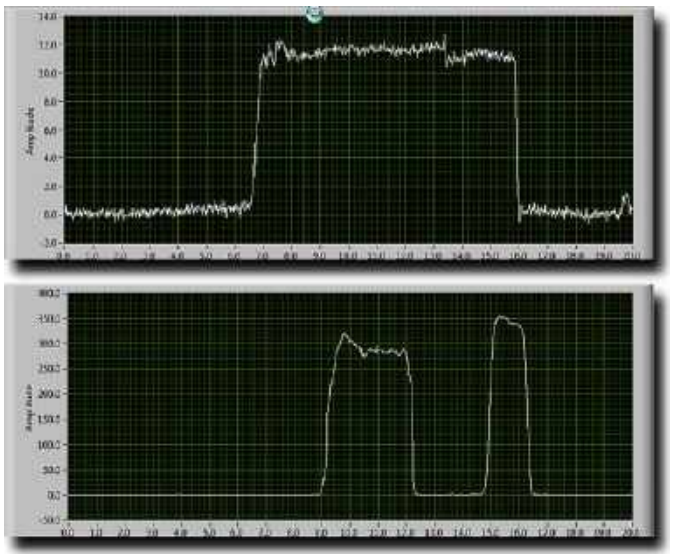
Drugim etapem realizacji projektu jest kalibracja toru pomiarowego. Przeprowadza się ją dwupunktowo, obciążając tensometr znanymi siłami. W tym przypadku jest to brak obciążenia i ciężarek o znanej masie. Siłę działającą na dynamometr przeliczamy, mnożąc masę w kilogramach przez 9,81. Przy braku obciążenia uzyskano wskazanie 29 μV (jest to ciężar samego dynamometru), a dla obciążenia masą 1,212 kg wskazanie było 80 μV. Charakterystyka toru pomiarowego jest zatem wyrażona równaniem:

$$y = \frac{(1{,}121-0)\cdot 9{,}81}{(80\mu - 29\mu)} - 223132\cdot 29\mu = 233132x - 6{,}76$$

Wyrażenie to należy wpisać w polu definiującym kanał pomiarowy przypisany do wejścia AIN0 w programie LJLogM (**rysunek 3**). W praktyce należało jeszcze nieco skorygować wartość ustalającą zerowe obciążenie na 8,2 zamiast 6,76.

Na tym kończy się faza realizacji projektu, można przystąpić do pomiarów. Najpierw obciążono dynamometr siłą kalibrującą 1,212 kG=11,89 N, a następnie zmierzono siłę ścisku dłoni – 280 N (lewa) i ok. 340 N (prawa) – bez rewelacji (**rysunek 4**).

Opisany przykład pokazuje, jak łatwo i szybko można przygotować praktyczną aplikację używającą modułów LabJack. W pomiarze zastosowaliśmy czujnik, który w większości przypadków wymagałby specjalnego interfejsu i dość złożonego oprogramowania. Tu działania ograniczyły się do wskazania trzech parametrów za pomocą myszki, jednego obliczenia i wpisania formuły matematycznej w programie wizualizującym pomiary. Prościej chyba się nie da.



Rysunek 4. Pomiar siły wzorcowej i siły ścisku dłoni za pomocą dynamometru i modułu LabJack T7

Jarosław Doliński, EP

Inne artykuły o wyrobach LabJack:

- U3-LV i U3-HV – „Elektronika Praktyczna" 05/2012 i 09/2012
- U6-Pro i UE9-Pro – „Elektronika Praktyczna" 10/2012
- T7 i T7-Pro – „Elektronik" 03/2020
- T4 – „Elektronik" 04/2020

REKLAMA

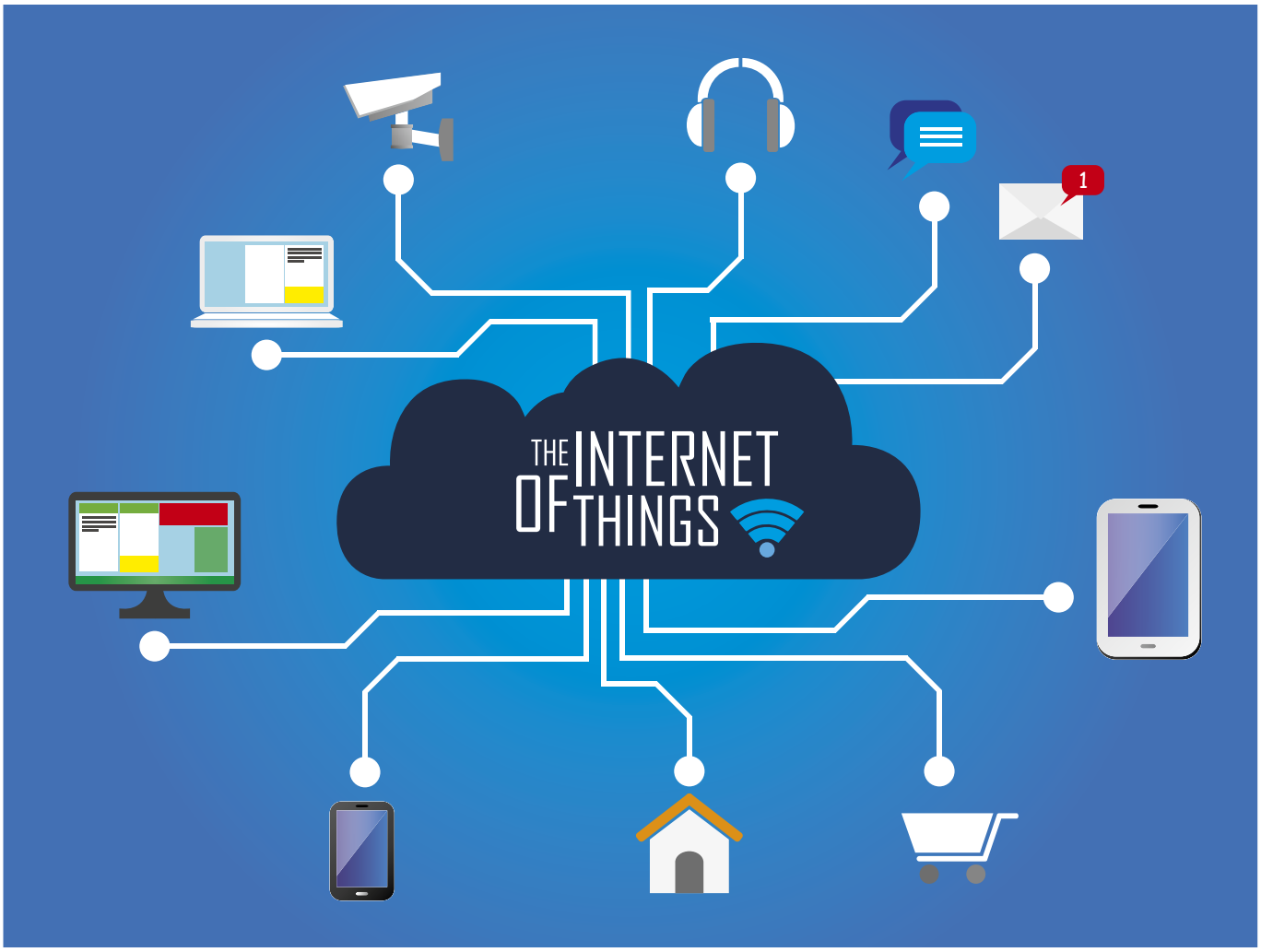
Egmont Instruments
tel. 228506205, 692501750
tiepie@egmont.com.pl, www.egmont.com.pl/tiepie

Egmont

Handyscope HS6 DIFF
przystawka oscyloskopowa DSO + tester EMI

- 4 wejścia BNC izolowane
- wejścia DIFF lub SE
- próbkowanie do 1 GS/s
- streaming do 200 MS/s
- pasmo do 250 MHz
- rozdzielczość 8, 12, 14, 16 bitów
- zakresy napięć +/–200 mV...+/–80 V
- pamięć do 256 MS
- interfejs USB 3.0
- funkcje: oscyloskop cyfrowy DSO, tester EMI, analizator widma, woltomierz, data logger/rejestrator, analizator protokołów
- praca synchroniczna wielu modułów

eprasa.pl 85168ce91e



Mikrokontrolery i moduły dla IoT

Technologie usprawniające produkcję oraz dostawę towarów stosuje coraz większa liczba firm, dlatego znaczenie innowacji półprzewodników wciąż rośnie. Producenci chipów nie zwalniają tempa. Układy, które produkują dzisiaj – i możliwości oprogramowania, które już opracowali – są podwaliną rewolucji technologicznej. Producenci półprzewodników żyją przyszłością i nie mają innego wyboru. Typowy cykl produkcyjny trwa około dwóch lat. Gromadzenie danych statystycznych zajmuje kolejny rok lub dwa. Mogą upłynąć cztery lub pięć lat, zanim układ będzie gotowy do powszechnego stosowania. Niesamowita technologia napędzająca nowoczesne urządzenia jest świadectwem przewidywania branży. Jeśli chcesz inwestować w przyszłość, z pewnością powinieneś współpracować z firmą zajmującą się półprzewodnikami.

Internet Rzeczy, zgodnie z ogólną definicją, stosuje układy komunikacji bezprzewodowej małej mocy, z dołączonymi czujnikami. Układy te nazywane są procesorami komunikacyjnymi i to im głównie poświęcony jest ten artykuł. Zostaną omówione tylko typowe lub najciekawsze układy, serie lub rodziny (ułożone wedle nazw firm w kolejności alfabetycznej). Obecnie rozwija się zastosowanie przetwarzania krawędziowego (*edge computing*), co wymaga zdecydowanie większej mocy obliczeniowej. Istnieje również duży obszar przemysłowego Internetu Rzeczy oraz zastosowań motoryzacyjnych. Są także mikrokontrolery do zadań specjalnych, omówione wcześniej [35].

Trendy IoT

Zanim przyjrzymy się rozwiązaniom sprzętowym, popatrzymy na informacje z ostatniego raportu Farnell IoT Trends Report 2020 [3]. Raport powstał na podstawie ankiet uzyskanych od 2015 inżynierów IoT.

Na pytanie „Co według Ciebie jest najważniejszym aspektem do rozważenia przy opracowywaniu rozwiązań IoT?”, 47% osób uważa bezpieczeństwo danych i ochronę za najważniejszy aspekt rozwiązań

eprasa.pl 85168ce91e

IoT. Również najwięcej osób uważa, że jest to główny problem związany z Internetem Rzeczy.

Preferowane języki programowania dla urządzeń IoT to: C – 70%, Python – 47% oraz Javascript – 22%. Jednak przy programowaniu z użyciem chmury obliczeniowej jest inaczej: Python – 52%, Javascript – 42% oraz Node – 24%.

Preferowany bezprzewodowy protokół komunikacyjny przy dołączeniu do chmury obliczeniowej to: Wi-Fi – 67%, Cellular (4G/LTE) – 38%, Bluetooth (BLE 5.0) – 35% oraz LoRa – 21%.

Komputery jednopłytkowe są nadal preferowanymi platformami do tworzenia produktów końcowych. Wyniki pokazują, że 54% programistów używa komputerów jednopłytkowych (takich jak Raspberry Pi, BeagleBone Black, Arduino itp.), ponieważ są one gotowe do użycia, pomagają przyspieszyć czas wprowadzenia produktu na rynek oraz zminimalizować koszty i ryzyko rozwoju. Inni wolą używać własnych projektów (30% respondentów) lub platform programistycznych, dostarczanych przez dostawców krzemu (13%).

Na podstawie wyników ankiety okazuje się, że 49% ankietowanych korzysta już ze sztucznej inteligencji (*AI, Artificial Intelligence*) we wdrażaniu Internetu Rzeczy. Uczenie maszynowe (ML) jest najczęściej używanym typem AI z 28% popularnością, a następnie AI opartym na chmurze (19%). Jednak 51% respondentów waha się przed użyciem AI, ponieważ są nowicjuszami w tej technologii lub szukają specjalistycznej wiedzy na temat wdrażania AI.

Rozwój scalonych procesorów komunikacyjnych podąża za trendem sposobu ich użytkowania, a czasami go stymuluje, jak w przypadku komunikacji komórkowej oraz lokalizacji.

Okazuje się, że jest ścisła zależność pomiędzy rodzajem użytej platformy sprzętowej i zastosowanym językiem programowania. Moc obliczeniowa dostępna w mikrokontrolerach wzrosła do tego stopnia, że zredukowana wersja jądra Pythona może być uruchomiona na mikrokontrolerze, który kosztuje tylko kilka dolarów. Istnieją już popularne porty open source dla Pythona, takie jak MicroPython, które są dostępne dla kilkunastu układów.

Języki C i C++ nie są nauczane w większości programów informatycznych lub inżynierskich. Już od dłuższego czasu stosowany jest język Python i trochę Java. Oznacza to, że w następnej dekadzie nastanie pokolenie inżynierów, którzy preferują używanie Pythona.

Szerokie stosowanie przetwarzania krawędziowego, a zwłaszcza sztucznej inteligencji, wymaga większych mocy obliczeniowych urządzeń IoT, co pozwala na szersze stosowanie języka Python.

OBSZARY ZASTOSOWAŃ IOT

Układy z komunikacją bliskiego zasięgu 2,4 GHz

Istnieje problem z jednoznacznym rozpoznaniem: jaki zakres specyfikacji wersji standardu Bluetooth obsługuje dany produkt. Obecnie producenci gremialnie deklarują, że ich produkt jest zgodny ze standardem Bluetooth 5.0, a ostatnio też z Bluetooth 5.2. Nie jest to do końca zabieg marketingowy, ponieważ okazuje się, że są to kwalifikacje zgodności ze specyfikacją Bluetooth Core Specification. Co nie wymaga obsługi wszystkich rozszerzeń 5.1 i 5.2, a działa kompatybilność wsteczna (przynajmniej takie jest wytłumaczenie). W najnowszej specyfikacji Bluetooth 5.2 została wprowadzona nowa generacja transmisji dźwięku o nazwie LE Audio. Ma ona znacząco poprawić jakość dźwięku.

Wiele układów scalonych, oprócz obsługi protokołu BLE, może w paśmie 2,4 GHz pracować także z komunikacją w standardzie IEEE 802.15.4. Umożliwia to dodatkową obsługę różnych protokołów: ZigBee, Thread, Wireless MBus, ANT oraz protokołów autorskich (*proprietary*).

Wi-Fi 6, znany również jako IEEE 802.11ax, opiera się na zaletach standardu 802.11ac, jednocześnie dodając większą wydajność, elastyczność i skalowalność. Daje to nowym i istniejącym sieciom zwiększoną szybkość i pojemność dla aplikacji nowej generacji.

Bluetooth bez baterii

Pojawiły się układy do pozyskiwania energii z sygnałów RF, takich jak stacje radiowe/telewizyjne, urządzenia bezprzewodowe, a nawet układy SoC z transmisją Bluetooth, szczególnie firmy Atmosic i Williot.

Pozyskanie energii w ten sposób umożliwia zrezygnowanie z baterii w aplikacjach o małej mocy, takich jak czujniki IoT i znaczniki identyfikacji radiowej (RFID). Więcej w artykule „Pozyskiwanie energii z fal radiowych" [50].

Układy z komunikacją dalekiego zasięgu w sieciach rozległych Sub 1GHz

Obsługa komunikacji w sieciach Internetu Rzeczy wymaga zastosowania sieci rozległych typu LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). Umożliwiają one przesyłanie danych na duże odległości przy obniżonym zużyciu mocy zasilania. Największe znaczenie mają następujące rozwiązania: LoRa (protokół zarządzany przez LoRa Alliance działający na platformie RF firmy Semtech), IEEE 802.15.4 (WiSUN) oraz Sigfox.

Komunikacja mobilna (komórkowa)

Wzrasta zastosowanie, w komunikacji bezprzewodowej, dedykowanych protokołów komórkowych IoT, szczególnie przy stałym rozwoju sieci 5G. Technologia komórkowa zaczyna migrować ze smartfonów do Internetu Rzeczy jako realna opcja dla połączeń o małej mocy w sieci rozległej LPWAN. Kilku dostawców półprzewodników, w tym Nordic Semiconductor, Qualcomm, Sequans Communications i Sony (Altair), wypuszcza na rynek chipsety, obsługujące standardy komórkowe, bazujące na LTE (LongTerm Evolution, 3G/4G/5G): NBIoT (Narrowband IoT) oraz LTEM (LongTerm Evolution Machine Type Communications).

Jednoczesna praca z dwoma protokołami

Bezpieczne tworzenie i obsługa bezprzewodowych sieci komunikacyjnych dla Internetu Rzeczy wymaga bezpiecznego sposobu przekazywania kluczy. Jednym ze sposobów jest stosowanie układów scalonych z jednoczesną obsługą transmisji z użyciem dwóch protokołów, np. BLE + Thread, BLE + Wi-Fi [45].

Praca dwuzakresowa

Oferowane są układy scalone, pozwalające na pracę dwuzakresową. Oprócz pracy w paśmie 2,4 GHz mogą one działać poniżej 1 GHz (Sub1GHz). W praktyce, w realiach europejskich, oznacza to pasma ISM 868 MHz oraz 440 MHz. Zwykle stosowana jest komunikacja w standardzie IEEE 802.15.4, który umożliwia obsługę różnych protokołów: 6LoWPAN, KNX RF, WiSUN, SUNFSK oraz rozwiązań autorskich producentów. Przykładowo układ scalony SimpleLink CC1352R firmy Texas Instruments może pracować w dwóch pasmach: 2,4 GHz i w pasmie 868 MHz/915 MHz [4].

Lokalizacja w pomieszczeniach

W ostatnim roku wdrożono dwie znaczące innowacje w śledzeniu obiektów i usługach lokalizacyjnych:

- w specyfikacji Bluetooth 5.1 technologie RTLS (*RTLS, Real Time Location System*), z detekcją kątową AoA i AoD [40];
- w technologii radiowej – transmisja ultraszerokopasmowa (UWB, *Ultrawideband*), z detekcją TWR RTLS.

Bluetooth LE i UWB to technologie uzupełniające się, dostosowane do szerokiej gamy konsumenckich i przemysłowych aplikacji IoT, szczególnie tych wymagających precyzyjnego pomiaru lokalizacji. UWB został zaprojektowany, aby zapewnić dokładność mikropozycjonowania w produktach, w tym smartfonach, inteligentnym domu, śledzeniu zasobów przemysłowych i motoryzacji. Bluetooth LE oferuje dojrzałą i wyrafinowaną bazę oprogramowania, gwarantującą współdziałanie UWB, a także bardzo małe zużycie energii TX i RX.

eprasa.pl 85168ce91e

Sztuczna Inteligencja (AI) podchodzi do krawędzi

Chociaż przyspieszenie działania aplikacji sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego jest wciąż stosunkowo nową dziedziną, powstaje wiele procesorów, które przyspieszają prawie każde zastosowanie sieci neuronowej.

Szczególnego znaczenia nabierają układy scalone bardzo małej mocy.

ARM

Firma ARM to największy zakulisowy gracz w dziedzinie półprzewodników. Około 23 miliardów chipów opartych na architekturze ARM dostarczono w zeszłym roku, a ich sprzedaż wyniosła ponad 1,8 miliarda dolarów. Firma ARM udziela licencji swoich chipów ponad 500 klientom na całym świecie, od firm Qualcomm i Broadcom, po Nvidia i Texas Instruments, a następnie zbiera opłaty licencyjne za każdy sprzedany chip. Oferuje również własność intelektualną firmie Apple, która w ostatnich latach rozwijała swoje chipy we własnym zakresie, oraz firmie Samsung Electronics. Technologia firmy ARM jest obecnie podstawą prawie każdego chipu w smartfonie.

W prawie wszystkich scalonych układach komunikacyjnych dla IoT stosuje się rdzenie procesorowe firmy ARM, szczególnie rodziny ARM CortexM. CortexM0 oraz CortexM0+ to najmniejsze układy rodziny). Większe układy (architektura ARMv7M to CortexM3 oraz CortexM4 (obliczenia zmiennoprzecinkowe). Nowsza generacja układów pracuje z architekturą ARMv8M oraz zawiera rozszerzenie ARM TrustZone. Obejmuje mniejszy układ CortexM23 oraz większy CortexM33. Rozwiązania organizacji układów scalonych (np. układów peryferyjnych), oferowanych przez poszczególnych producentów, są różne [43].

Ostatnio ARM zmienił swój model licencjonowania, aby przyciągnąć więcej klientów do swoich projektów chipów, poprawić swoją pozycję na rynku IoT i odeprzeć mniejszych rywali – innych architektur chipów typu open source. Wprowadzono program, zapewniający klientom dostęp do szerokiego zakresu własności intelektualnej z roczną opłatą, naliczanie tylko opłat licencyjnych za IP używane w produkcji [7]. Program ma przeciwdziałać gwałtownemu rozwojowi architektury RISC-V, prowadzonej w dużej mierze przez startup SiFive z Santa Clara w Kalifornii.

Agencja DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) podpisała umowę, udostępniającą technologię chipów firmy ARM. ARM nawiązał współpracę, zapewniając agencji dostęp do własności intelektualnej, narzędzi i wsparcia na trzy lata. Agencja zainwestowała 1,5 miliarda dolarów w ramach inicjatywy Electronics Resurgence, aby zachęcić do przełomów w architekturze chipów, materiałach, projektowaniu i innych obszarach. Departament Obrony USA próbuje zmniejszyć swoją zależność dostaw chipów z Chin i innych państw Azji [8].

ARC

Procesory wbudowane ARC (*Argonaut RISC Core*) to rodzina 32-bitowych rdzeni, pierwotnie zaprojektowanych przez ARC International, które zostało przejęte przez Synopsys w 2010 roku. Obecnie procesory ARC wykorzystują zredukowany zestaw instrukcji (RISC) oraz 32-bitową architekturę zestawu instrukcji ARCv2 (ISA), która zapewnia dobrą wydajność i gęstość kodu dla wbudowanych i hostowych aplikacji SoC.

Procesory rodziny DesignWare ARC EM firmy Synopsis są zoptymalizowane do użytku w aplikacjach wbudowanych, w których niezbędna jest duża wydajność, przy minimalnym zużyciu energii. Obejmują rodzinę ARC EM4/EM6 oraz procesory z rozszerzeniem DSP. Rodzina ARC EM5D/EM7D jest przeznaczona do aplikacji wbudowanych, w których wymagana jest wydajność DSP i niskie zużycie energii. Zawiera procesory RISC + DSP oraz ponad 150 instrukcji DSP. Rodzina ARC EM9D/EM11D jest przeznaczona do urządzeń intensywnie korzystających z DSP, takich jak obsługa wielu czujników, wykrywanie głosu, rozpoznawanie mowy i przetwarzanie dźwięku. Ma wielobankową pamięć XY, która składa się z banków pamięci, wskaźników adresowych, rejestrów aktualizacji adresu i jednostek generowania adresów (AGU). Obsługuje obliczenia DSP: stałoprzecinkowe oraz wektorowe (SIMD). Rdzenie oferują wyjątkowo dużą wydajność, zapewniając 1,81 DMIPS/MHz i 4,02 CoreMark/MHz, przy bardzo małej powierzchni i wyjątkowo małym zużyciu energii [9]. Układ ARC EM22FS zawiera dwurdzeniowy ultrakompaktowy rdzeń do krytycznych zastosowań motoryzacyjnych o niskim poborze mocy.

Firma oferuje również rozwiązania IP, ukierunkowane na zastosowania komunikacji bezprzewodowej IoT (z kodekiem LC3), zastosowania audio oraz dla układów zawsze włączonych (rozpoznawanie mowy i gestów).

Licencje na procesory ARC uzyskało ponad 200 firm i są dostarczane w ponad 1,5 miliarda produktów rocznie. Dobrym przykładem są układy komunikacyjne EM9301 oraz EM9304 firmy EM Microelectronic [10].

RISC-V

RISC-V (otwarty model programowy procesora) jest być może czarnym koniem dla systemów wbudowanych. Opracowanie RISC-V rozpoczęło się w 2010 r. na Uniwersytecie Kalifornijskim w Berkeley [1]. Pierwsze publiczne wdrożenie RISC-V miało miejsce podczas Sympozjum Hot Chips w sierpniu 2014 r. Technologia szybko zyskała popularność na wielu rynkach ze względu na swoją zwartość, modułowość i rozszerzalność. Oprócz ogólnego zastosowania, specyfikacja RISC-V zachęca do dostosowywania rozszerzeń instrukcji celem ułatwienia architektury/akceleracji, specyficznej dla aplikacji takich jak: AI, uczenie maszynowe (ML), rzeczywistość wirtualna (VR), rzeczywistość rozszerzona (AR) oraz zaawansowane systemy wspomagania kierowcy (ADAS).

Podstawowy zbiór instrukcji (I*SA, Instruction Set Architecture*) rdzenia RISC-V jest zamrożony na zawsze. Opcjonalnie można zaimplementować rozszerzenia. RISC-V to „otwarty sprzęt" na podobnej zasadzie co system Linux dla oprogramowania open source.

Wiele korporacji wdraża RISC-V, aby zarabiać na swoich rdzeniach. Dostawcy IP tacy, jak Andes Technology, Codasip, Bluespec i Cortus, oferują rdzenie RISC-V do zaimplementowania w krzemie. SiFive ma zarówno rdzenie IP, które można licencjonować, jak i konfigurowalny układ krzemowy oparty na RISC-V, w tym 32-bitowy SoC RISC-V, który jest już dostępny w sprzedaży. Firmy Microsemi, Rumble Development i VectorBlox oferują programowe rdzenie RISC-V, działające w układach FPGA (wiele darmowo).

Szybkość i wydajność procesora zależy całkowicie od jakości implementacji, w tym projektu mikroarchitektury, projektu układu i zastosowanej technologii procesu. Zasadniczo implementacja RISC-V nie powinna być mniej wydajna niż x86 lub ARM. W rzeczywistości modułowość projektu RISC-V ISA umożliwia implementacje bardziej wydajne niż te starsze architektury. Ponieważ RISC-V ISA jest otwarty, każdy ma efektywną licencję na mikroarchitekturę do implementacji najbardziej zoptymalizowanego procesora do swoich aplikacji.

Codasip i SiFive mają prototypy rdzeni FPGA, które można przenieść na niestandardowy krzem. Microsemi dostarcza RTL (synteza dla FPGA) dla swoich programowych rdzeni RISC-V. Dzięki RTL łatwo jest zrobić port do ASIC i nie ma potrzeby płacenia za licencje IP, ani stałych opłat.

Esperanto Technologies, startup z Doliny Krzemowej, buduje chipy zawierające tysiące procesorów RISC-V. Giganci technologiczni, tacy jak Google, również należą do 235 członków Fundacji RISC-V, choć nie jest jasne, czy mają plany RISC-V. Qualcomm, Nvidia i inni główni dostawcy półprzewodników projektują procesory RISC-V do wykonywania sterowania wewnątrz chipów, zamiast uruchamiania aplikacji. Qualcomm planuje zainstalować procesory RISC-V w swoich procesorach do smartfonów, co według analityków branżowych może osiągnąć setki milionów dostaw rocznie. Nvidia, która według analityków dostarcza około 40 milionów procesorów graficznych rocznie, również planuje dodać rdzenie RISC-V do swoich GPU.

eprasa.pl 85168ce91e

To może być tylko wierzchołek góry lodowej dla architektury RISC-V. SiFive oferuje klientom 32-bitowe rdzenie, przeznaczone dla IoT i uzupełnia je o rdzenie 64-bitowe, które, jak twierdzi, mogą być używane do obsługi zadań związanych z autonomiczną jazdą i sztuczną inteligencją, w urządzeniach IoT i centrach danych (między innymi). SiFive twierdzi, że oferuje dostęp do rdzeni procesorów, które konkurują z produktami ARM CortexA, CortexR i CortexM.

SiFive i inni gracze w przestrzeni RISC-V wciąż mają przed sobą trudną drogę. RISC-V posiada niewielki udział w rynku ARM. Chipy oparte na architekturze ARM dominują w przestrzeni smartfonów i są obecnie podstawą większości urządzeń Internetu Rzeczy.

Jeśli chodzi o sztuczną inteligencję, kolejną interesującą firmą jest GreenWaves Technologies, której bardzo energooszczędne i wydajne punkty dostępowe GAP8 udostępniają AI w urządzeniach IoT zasilanych bateryjnie. GreenWaves jest kluczowym współtwórcą platformy open source, opartej na równoległej platformie przetwarzania ultra niskiego poboru mocy (PULP), opartej na RISC-V, która stanowi podstawę dla procesorów GAP8. Układ GAP9 jest znaczącym ulepszeniem poprzedniego modelu.

Firma AdaCore ogłosiła w styczniu, że dołączyła do RISC-V Foundation, wprowadzając języki programowania Ada i Spark na czołowe miejsce w technologiach dostępnych dla programistów RISC-V. Więcej szczegółowych informacji można znaleźć w artykułach „RISC-V – budujemy własny mikrokontroler" [36].

Układy SoC (System on Chip)

Prawie wszystkie układy scalone dla Internetu Rzeczy są typu SoC. Zwykle to układy jednordzeniowe lub wielordzeniowe z bardzo rozbudowaną listą modułów peryferyjnych i dosyć skomplikowaną budową wewnętrzną.

Najbardziej rozbudowane układy scalone są: wielordzeniowe (multi core), z obsługą wielu protokołów komunikacyjnych (multi protocol) oraz dwuzakresowe (dual band). Przykładem jest układ SimpleLink CC1352R firmy Texas Instruments [4].

Rdzeń aplikacyjny

Jako rdzeń główny (aplikacyjny) układu SoC stosowany jest typowo ARM CortexM4F, który umożliwia wykonywanie obliczeń zmiennoprzecinkowych oraz obliczeń sygnałowych. Przez firmę ARM nazywany jest procesorem DSP (procesor sygnałowy). W nowszych układach zastosowano rdzeń ARM CortexM33. Jako rdzeń główny użyto ARM CortexM3, typowo dla starszych układów. W układach bardzo małej mocy stosowany jest często, jako jedyny, rdzeń ARM CortexM0+. W układach przeznaczonych do wykonywania przetwarzania sygnału stosowane są rdzenie DSP.

Rdzeń komunikacyjny

Wiele układów scalonych ma budowę dwurdzeniową. Drugi rdzeń pracuje niezależnie i standardowo obsługuje komunikację bezprzewodową (procesor sieciowy). Najczęściej, jako drugi, stosowany jest rdzeń ARM CortexM0 lub CortexM0+. Obsługa komunikacji realizowana jest programowo z kodem umieszczonym w pamięci ROM, z możliwością zastosowania kodu z pamięci Flash i rekonfiguracji radia, włącznie z własnym protokołem.

Unikalną cechą układu scalonego nRF5340 firmy Nordic Semiconductor jest zastosowanie dwóch takich samych rdzeni ARM CortexM33 jako rdzeń aplikacyjny i komunikacyjny [5].

Rdzeń pomocniczy

Niektóre układy scalone mają trzeci rdzeń Sensor Controller o bardzo małym poborze mocy. To wyjątkowe rozwiązanie służy do inteligentnej obsługi układów peryferyjnych. Bez konieczności budzenia rdzenia głównego.

Przykładem są układy scalone rodziny SimpleLink CC13x2R/CC26x2R firmy Texas Instruments [4] oraz rodzina SmartBond DA1469x firmy Dialog [16].

ModułySiP (System in Package)

Moduły SiP to funkcjonalne systemy lub podsystemy, umieszczone w standardowej obudowie takiej jak: LGA, FBGA, QFN lub FOWLP. Zawierają dwie lub więcej różnych struktur scalonych, zazwyczaj łączonych z innymi komponentami, np. układy pasywne, filtry, MEMS, czujniki i/lub anteny. Komponenty są montowane razem na podłożu, aby stworzyć zindywidualizowany, wysoce zintegrowany produkt. Moduły SiP mogą wykorzystywać kombinację różnych zaawansowanych metod montażu [42].

Istnieją podstawowe wymagania, które moduł SiP powinien spełniać:

- Integracja różnych aktywnych elementów półprzewodnikowych i elementów pasywnych w jednym systemie, w którym aktywnymi komponentami mogą być mikroprocesory, pamięci, wyspecjalizowane urządzenia przetwarzające, obwody analogowe, zarządzanie energią i czujniki;
- Miniaturyzacja;
- Skalowalność umożliwiająca korzystanie z niewielkiego rozmiaru produkcji.

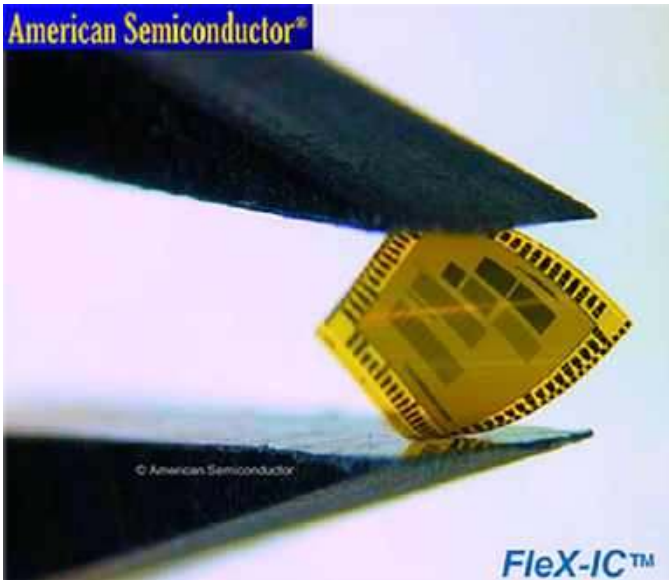
W tym miejscu koncepcja „tego, co jest dobre w świecie półprzewodników" uzupełnia koncepcję „tego, co jest dobre w świecie systemów". Technologia SiP może rozwiązać wiele problemów związanych z projektowaniem i produkcją, umożliwiając szybszy i łatwiejszy rozwój elektroniki. Dostępnych jest wiele modułów SiP, np. moduł HJ840 chińskiej firmy Tangshan Hongjia Electronic, z układem scalonym nRF52840 firmy Nordic Semiconductor [21], moduł RSL10 SiP firmy ON Semiconductor [25] czy moduł nRF9160 SiP firmy Nordic Semicoductor [33].

Elastyczne układy SoP (Silicon-on-Polymer)

FleX Silicon-on-Polymer to rewolucyjny proces tworzenia na elastycznym podłożu układów scalonych CMOS, z jedną strukturą silikonową oraz z metalowymi połączeniami pomiędzy warstwami. Umożliwia tworzenie nowej generacji wydajnych, trwałych, elastycznych układów scalonych, które znacznie zwiększają możliwość integracji funkcjonalności CMOS z elastyczną elektroniką (**fotografia 1**). Dostarcza w pełni funkcjonalne, elastyczne płytki wafla o końcowej grubości krzemu, tak

REKLAMA

eprasa.pl 85168ce91e



Fotografia 1. Elastyczny układ scalony krzemowo-polimerowy [6]

cienkiej jak 2000 Å (angstremów). FleX można zastosować do procesów technologii SOI (Silicon on Insulator). Oferuje nowe możliwości pakowania i integracji 3D układów scalonych. Został zastosowany zarówno w skali wafla, jak i do montażu na nieregularnej powierzchni. Wyniki testu tej samej struktury scalonej jako płytki pełnej grubości i płytki waflowej wykazują niewielkie zmiany parametrów elektrycznych, a niektóre parametry ulegają poprawie [42]. Przykładem jest układ scalony AS_NRF51 FleXBLE firmy American Semiconductor [6].

Moduły sprzętowe

Projektowanie płytek drukowanych, do pracy ze scalonymi układami radiowymi, jest trudne i drogie. Dlatego bardzo ważna dla użytkownika jest dostępność modułów z tymi układami. Są ich cztery kategorie: zestawy uruchomieniowe, wtyczki USB, moduły czujnikowe oraz moduły produkcyjne. Ale jest jeszcze dodatkowa kategoria – zestawy Arduino.

Zestawy uruchomieniowe

Tworzenie sieci Internetu Rzeczy wymaga prototypowania planowanych rozwiązań sprzętowych i programowych. Dobrze do tego nadają się gotowe sprzętowe moduły uruchomieniowe, oferowane przez producentów układów SOC oraz innych dostawców.

Praktycznie każdy producent układów scalonych dla Internetu Rzeczy oferuje zestawy uruchomieniowe. Umożliwiają one szybkie rozpoczęcie pracy z wybranym układem scalonym. Standardowo są one dostarczane z zaprogramowaną aplikacją demonstracyjną, pozwalającą na natychmiastową pracę „prosto z pudełka". Razem z projektami przykładowymi dostarczanymi przez producenta daje to możliwość łatwego rozpoczęcia praktycznej pracy z układem scalonym. Istotną własnością zestawu uruchomieniowego jest możliwość debugowania kodu w czasie rzeczywistym, ze wspomaganiem sprzętowym. Pożądaną cechą zestawu uruchomieniowego jest też dosyć niska cena, typowo w granicach 30…50 $.

Wtyczki USB

Wtyczki USB składają się typowo z minimum elementów, oprócz układu SoC. Mają za to niską cenę, za którą udostępniają niemal pełną funkcjonalność zainstalowanego układu SoC. Największą zaletą wtyczki jest możliwość pracy jako sniffer do „podglądania" na bieżąco ruchu radiowego z różnymi protokołami, w tym Thread. Typowo wtyczki pracują z programem Wireshark. Wtyczki USB oferują producenci układów SoC, ale też niezależni wytwórcy.

Moduły czujnikowe

Dla rozwoju Internetu Rzeczy bardzo ważna jest dostępność kompletnych modułów komunikacji radiowej z zestawem czujników. Jest wiele zestawów pracujących z protokołem Bluetooth 5.2, np. CC1352R LaunchPad SensorTag firmy Texas instruments [52], Nordic Thingy:52 IoT Sensor Kit firmy Nordic Semiconductor [49]. Są również zestawy z komunikacją mobilną IoT, np. Nordic Thingy:91 firmy Nordic Semiconductor [34].

Moduły produkcyjne

Moduły produkcyjne umożliwiają zastosowanie wybranego układu scalonego w projekcie produkcyjnym. Ma to bardzo duże znaczenie wobec wymagania certyfikatu zgodności układu radiowego z wymaganiami np. Unii Europejskiej. Moduł produkcyjny jest gotowy do dołączenia bezpośrednio do własnego projektu, bez konieczności znajomości zagadnień projektowania układów radiowych.

Moduły produkcyjne mogą być oferowane przez producenta układu scalonego, ale standardowo są one też produkowane przez innych dostawców (3rd Party). Jest to bardzo istotna dziedzina, która może decydować o popularności układu scalonego na rynku. Listy modułów należy szukać na portalach producentów układów scalonych.

Zastosowanie rdzenia RISC-V

Wzrasta zastosowanie rdzeniami RISC-V w układach przeznaczonych dla IoT. Niektóre z nich mają udostępniony dosyć dokładny opis. Opisy układów GAP8 i GAP9 będą zmieszczone w kolejnym artykule.

GIGADEVICE SEMICONDUCTOR

Układ GD32VF103 z rdzeniem RISC-V

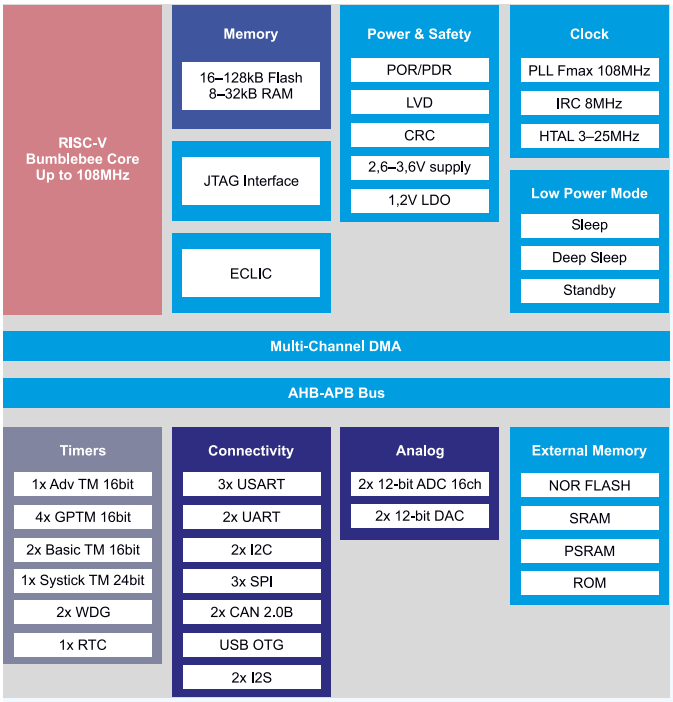
Mikrokontroler GD32VF103 firmy GigaDevice Semiconductor jest oparty na rdzeniu Bumblebee (RISC-V) [11]. To ten sam rdzeń, który jest używany w chipie AndeStar V5 firmy Andes Technology. Rdzeń Bumblebee obsługuje zestaw instrukcji RV32IMAC. Oznacza to, że jest to 32-bitowy rdzeń typu integer (RV32I), z obsługą mnożenia/dzielenia (M), instrukcji atomowych (A) i instrukcji skompresowanych (C). System wykorzystuje dwustopniową architekturę potokową o zmiennej długości.

Jest bardzo podobny do innych popularnych 32-bitowych architektur mikrokontrolerów (**rysunek 1**). Skompresowane 16-bitowe instrukcje mogą spowodować zmniejszenie rozmiaru kodu o 25…30%.

32-bitowy chip działa z częstotliwością 108 MHz i ma zwykły zestaw mikrourządzeń peryferyjnych. Obejmuje to wiele timerów, UART, SPI, I^2C, I^2S i zewnętrzny kontroler pamięci. Dołączone są podwójne kontrolery CAN 2.0B i kontroler USB 2.0 OTG. Istnieje również mieszanka 16-to i 24-bitowych timerów RISC-V, a GigaDevice dodaje 64-bitowy zegar czasu rzeczywistego. Analogowe urządzenia peryferyjne obejmują: przetwornik ADC 1 Msample/s; podwójne 12-bitowe, 16-kanałowe przetworniki ADC; podwójne 12-bitowe przetworniki DAC. Dostępne są wersje z maksymalnie 80 GPIO.

System wymaga zasilania od 2,6 do 3,6 V DC i ma piny I/O tolerujące 5 V. Ma wiele trybów niskiego poboru mocy oraz pobór prądu w stanie czuwania, na poziomie 6,3 µA. Opcje obudowy obejmują QFN36, LQFP48, LQFP64 i LQFP100. Wśród dostępnych narzędzi programistycznych są Nuclei Studio, IoT Studio i SEGGER Embedded Studio oraz IAR Embedded Workbench. Układ jest kompatybilny z różnymi systemami operacyjnymi, takimi jak µC/OS II, FreeRTOS, RTThread, TencentOStiny i LiteOS.

eprasa.pl 85168ce91e



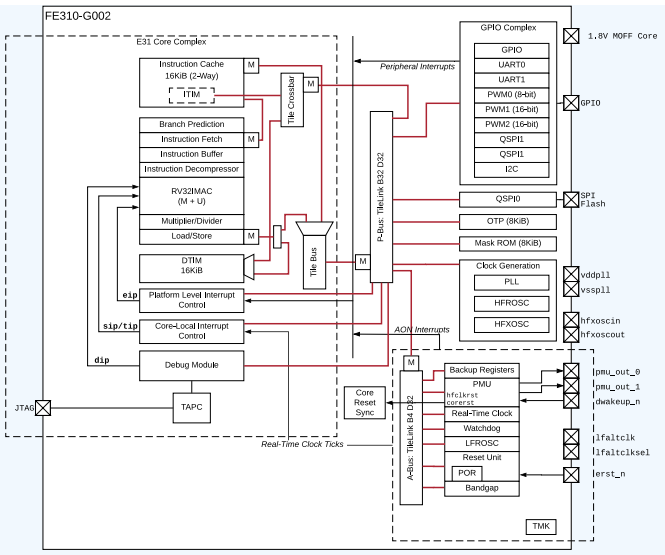
Rysunek 1. Schemat blokowy układu GD32VF103 firmy GigaDevice Semiconductor [11]

SiFive

Układ FE310 z rdzeniem RISC-V

FE310 firmy SiFive to pierwszy mikrokontroler SoC o niskim poborze mocy, RISC-V (Version 1.9.1), zaprojektowany przy użyciu firmowej metodologii IdeatoSilicon, ze standardowym rdzeniem E31 firmy SiFive [37].

Układ FE310G002 firmy SiFive ma architekturę RV32IMAC. Układ ma szesnaście 32-bitowych rejestrów i nie ma stosu sprzętowego.



Rysunek 2. Schemat blokowy układu FE310-G002 firmy SiFive [37]

Podobnie jak w przypadku wielu systemów RISC, używa instrukcji JAL do zapisania adresu zwrotnego w rejestrze.

Układ FE310 firmy SiFive stosuje rdzeń RISC-V (320+ MHz), 16 kB L1 Cache, 16 kB Data SRAM, ROM 8 kB, OTP 8 kB oraz interfejs QSPI (**rysunek 2**) [37]. Wybrane parametry układu:

- wydajność 1,61 DMIP/MHz,
- napięcie zasilania 1,8...3,3 V,
- pobór prądu w stanie aktywnym – 1,8 V 8/150 mA (16/250 MHz), 3,3 V 8/16 mA (16/250 MHz),
- układy peryferyjne: 3×QSPI, 2×UART, PWM, I²C,
- obudowa 48QFN 6,0×6,0×0,85 mm.

Firma udostępnia tanią płytkę ewaluacyjną HiFive1 Rev B, kompatybilną z Arduino z komunikacją Bluetooth, Bluetooth LE i Wi-Fi 802.11n oraz z pamięcią ISSI SPI Flash 32 Mbit.

Obsługa protokołu Bluetooth

Większość układów scalonych dla IoT obsługuje protokół Bluetooth Low Energy. Układy scalone z obsługą Bluetooth 5 zostały omówione w poprzednim artykule [43]. Od tego czasu pojawiły się istotne rozszerzenia standardu 5.1 i 5.2. Bieżący artykuł omawia układy z obsługą nowych rozszerzeń. Wiele układów obsługuje też komunikację w standardzie Thread [41].

AMERICAN SEMICONDUCTOR

Układ AS_NRF51822P – pierwszy układ Siliconon-on-Polymer (SoP) dla IoT

Układ scalony AS_NRF51822P firmy American Semiconductor jest ultracienką wersją układu scalonego nRF51822 firmy Nordic Semiconductor [6]. Do produkcji zastosowano technologię FleX SoP firmy American Semiconductor. Grubość pakietu krzemowego została zmniejszona do około 35 µm – o połowę mniejszą niż ludzki włos. Dodatkowa warstwa polimerów z przodu i z tyłu zapewnia wytrzymałość mechaniczną, co umożliwia wyginanie układu bez złamania (**fotografia 2**).

Układ scalony został zaprojektowany z myślą o rozwiązaniach, które wymagają ultramałej grubości, elastyczności fizycznej i wysokiej niezawodności w zastosowaniach, od urządzeń noszonych i logistyki, po IoT.

Istotną zaletą układu jest zgodność z układem nRF51822 firmy Nordic Semiconductor. Umożliwia to wykorzystanie gotowego środowiska programowego, pakietu oprogramowania pomocniczego i stosów protokołów, co upraszcza opracowywanie urządzeń z nowym układem. Układ AS_NRF51822P zawiera procesor ARM CortexM0+, 256 KB pamięci Flash, 32 KB pamięci RAM. Wybrane parametry układu:

- obsługuje protokół Bluetooth 4.2, 250 kbs, 1 Mbps, 2 Mbps,
- pracuje z napięciem zasilania 1,8...3,6 V,
- zawiera: czujnik temperatury, 10-bitowy przetwornik ADC, przetwornicę DC/DC, moduły I²C, UART i SPI,
- zawiera moduł kryptograficzny AES 128 oraz TRNG,
- wymiary 3,8×3,8 mm, grubość około 35 µm, rozmiar wyprowadzenia (pad) 56×56 µm (min.),
- jest pierwszym elastycznym procesorem komunikacyjnym z obsługą BLE.

eprasa.pl 85168ce91e

CYPRESS (INFINEON)

Portfolio układów firmy Cypress (obecnie część firmy Infineon) jest bardzo rozbudowane i zawiera wiele rodzin mikrokontrolerów [12]. Zaprezentuję tylko wybrane układy z obsługą komunikacji Bluetooth. Dostępne są też moduły SiP (z obsługą Bluetooth 4.0/4.1) oraz moduły WICED typu „combo", które w jednym układzie scalonym integrują komunikację IEEE 802.11a/b/g/n/ac WLAN oraz Bluetooth 5.0/5.1.

Rodzina PSoC 6 BLE

Układy SoC rodziny PSoC 6 BLE zostały stworzone specjalnie do zastosowań IoT i obsługują protokół Bluetooth 5.0 BLE. Układy serii PsoC 60 i PsoC 61 mają tylko jeden rdzeń ARM CortexM4 (150 MHz). Układy serii PsoC 63 i PsoC 64 mają dodatkowy rdzeń ARM CortexM0+ (100 MHz) [13].

Rodzina mikrokontrolerów PSoC 6 jest wyposażona w moduły wspomagania bezpieczeństwa, takie jak sprzętowe akceleratory kryptograficzne, generator liczb losowych (TRNG) oraz jednostki zabezpieczające, używane do implementacji do 8 kontekstów ochrony.

Dwurdzeniowa architektura PsoC 6 jest idealna do tworzenia izolowanych środowisk przetwarzania. Procesor CortexM4 służy do ustanowienia niezabezpieczonego środowiska przetwarzania (NSPE), a CortexM0+ jest używany do ustanowienia bezpiecznego środowiska przetwarzania (SPE), za pomocą jednostek ochrony wbudowanych w PsoC 6 (**rysunek 3**). Oprogramowanie Trusted FirmwareM, pracujące w środowisku SPE, komunikuje się z NSPE poprzez sprzętowy interfejs międzyprocesorowy (IPC). Obszar zaufany jest izolowany od SPE, zapewnia niezmienną tożsamość urządzenia i umożliwia bezpieczne przechowywanie kluczy. Usługi bezpieczeństwa obejmują bezpieczne uruchamianie, udostępnianie i atestację.

PSoC 6 zapewnia wysoką wydajność i niski pobór mocy, a także bezpieczeństwo, którego wymagają urządzenia IoT nowej generacji. Wszystko na słynnym programowalnym układzie PSoC.

Wybrane parametry układów linii PsoC 6 – CY8C63x6, CY8C63x7 [13]:

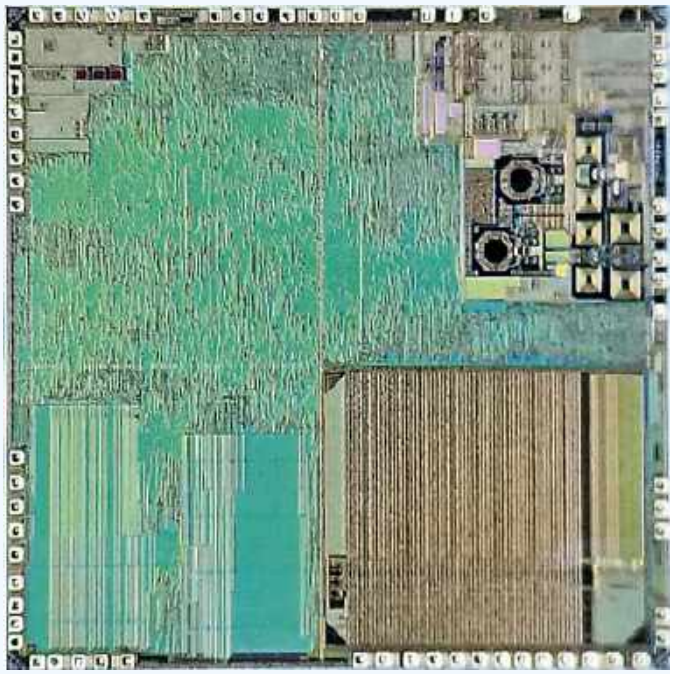
- Programowana moc wyjściowa w zakresie od –20 dBm do +4 dBm;
- Czułość odbiornika –95 dBm;
- Maksymalny prąd odbiornika 6,7 mA dla 2 Mbps (typ.);
- Maksymalny prąd nadajnika 5,7 mA dla 0 dBm (typ.);
- Prąd: w stanie głębokiego uśpienia <1 µA (z podtrzymaniem pamięci 64 KB);
- Przy pracy rdzeni układu w różnych trybach ULP 0,9 V/LP (1,1 V) pobór prądu wynosi: CortexM0+ 15 µA/MHz (22 µA/MHz), CortexM4 22 µA/MHz (40 µA/MHz);
- Cechy unikalne: Obsługuje jednocześnie do 4 połączeń BLE 5.0.

Najnowszy procesor CYB06447BZID54 linii PSoC64 ma dodatkowe mechanizmy bezpieczeństwa. Linia PsoC 64 jest wyposażona w sprawdzone oprogramowanie zabezpieczające, które pomaga przyspieszyć wdrażanie bezpiecznego projektu. Produkt do bezpiecznego rozruchu dostarczany jest z wcześniej ustalonym zaufaniem, które umożliwia programiście łatwe wdrażanie i bezpieczne aktualizacje oprogramowania układowego.

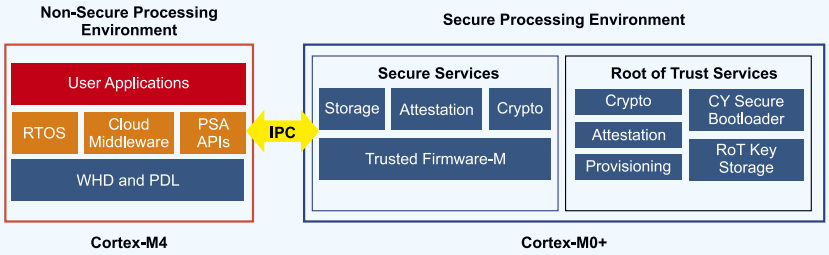
Układ CYW20819 z obsługą Bluetooth 5.2

Układ CYW20819 to scalone rozwiązanie Bluetooth 5.2, przeznaczone dla sieci Bluetooth, audio, głosu, urządzeń do noszenia, myszy, klawiatur, konsol do gier, pilotów, automatyki domowej i szerokiej gamy innych aplikacji Internetu Rzeczy [14]. CYW20819 w pełni implementuje specyfikację Bluetooth Mesh 1.0 i wykorzystuje najwyższy poziom integracji w celu wyeliminowania zewnętrznych komponentów.

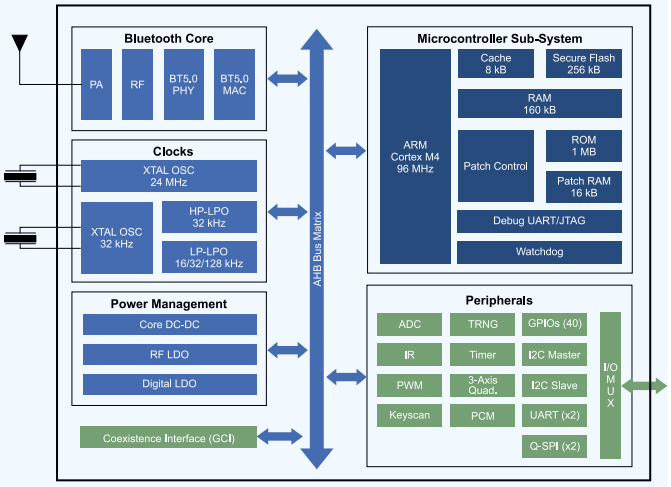
CYW20819 integruje Ultra-Low Power (ULP) BLE z możliwością dodania funkcji dla urządzeń do noszenia i śledzenia. Zapewnia również



Fotografia 2. Widok struktury modułu AS_NRF51822P typu SoP firmy American Semiconductor [6]



Rysunek 3. Izolowane środowiska przetwarzania układów rodziny PSoC 6 firmy Cypress [13]



Rysunek 4. Schemat blokowy CYW20819 firmy Cypress [14]

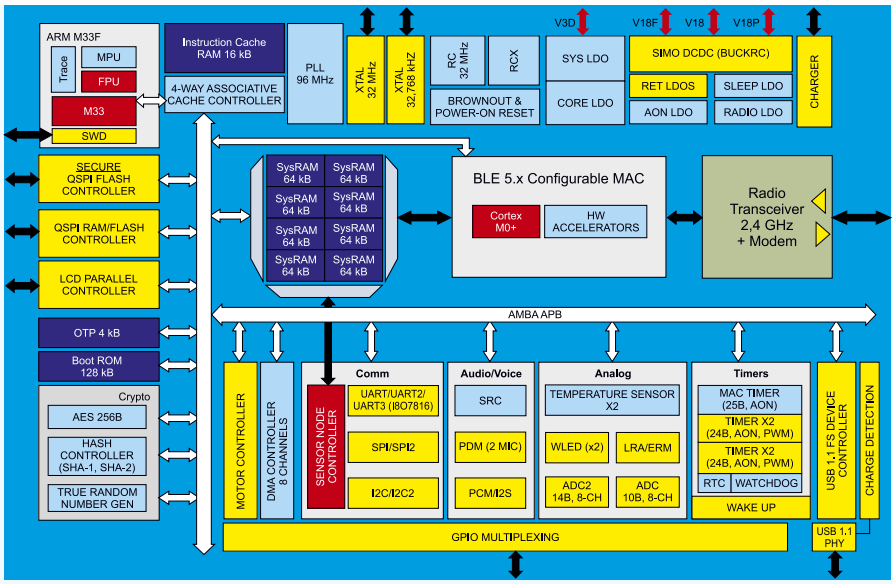
eprasa.pl 85168ce91e

najlepszą w swojej klasie czułość odbiornika, zarówno dla BLE, jak i EDR.

Układ CYW20819 wyposażono w rdzeń ARM CortexM4 (96 MHz, max.) z pamięcią RAM 176 kB, Flash 256 kB (**rysunek 4**). Wybrane parametry układu:

- Obsługuje BR, EDR 2 Mbps i 3 Mbps, eSCO, BLE, LE 2 Mbps i Bluetooth Mesh 1.0;
- Jednoczesna obsługa transmisji Bluetooth Classic audio oraz BLE;
- Programowana moc wyjściowa w zakresie od –24 dBm do +4 dBm;
- Czułość odbiornika –95 dBm (dla BLE 1 Mbps);
- Maksymalny prąd odbiornika 5,9 mA (typ.);
- Maksymalny prąd nadajnika 5,8 mA dla 4 dBm (typ.);
- Prąd: w stanie uśpienia 16,5 µA (z podtrzymaniem pamięci 176 KB);
- Prąd: w stanie głębokiego uśpienia 1,75 µA;
- Moduł kryptograficzny AES128, generator TRNG, weryfikacja podpisu ECDSA;
- Aktualizacje oprogramowania sprzętowego OTA;
- Cechy unikalne: obsługuje podstawową specyfikację Bluetooth w wersji 5.2.

Dostępny jest firmowy moduł CYBT21304302 o rozmiarach 12,0×16,61×1,70 mm, zawierający układ scalony CYW20819, oscylator kwarcowy, elementy pasywne oraz antenę.



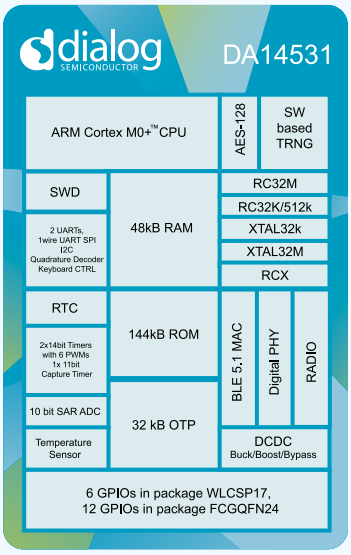
Rysunek 6. Schemat blokowy układów rodziny DA1469x firmy Dialog Semiconductor [16]

SMARTBOND – RODZINA UKŁADÓW SoC FIRMY DIALOG SEMICONDUCTOR

Wysoce zintegrowana rodzina układów SoC o nazwie SmartBond firmy Dialog Semiconductor zapewnia najmniejsze, najbardziej energooszczędne rozwiązania Bluetooth o niskim zużyciu energii uzyskanie najniższych kosztów systemu. Obejmuje rozwiązania ogólne i zoptymalizowane pod kątem aplikacji, w różnych opcjach pamięci, w kompatybilnych obudowach, łącząc elastyczność projektowania z łatwą redukcją kosztów. Wspierana jest przez firmowe oprogramowanie SmartSnippets i rozbudowane wsparcie dla aplikacji, ułatwiając projektantom maksymalne wykorzystanie ich systemu.

SmartBond TINY DA14531

SmartBond TINY DA14531 to najmniejszy i najniższy na świecie układ SoC, z obsługą Bluetooth 5.1 [15]. Mały koszt układu (0,50 USD, przy dużych zakupach) osiągnięto dzięki wysokiemu poziomowi integracji. Kompletny system Bluetooth można osiągnąć poprzez dodanie 6 małych zewnętrznych elementów pasywnych, kwarcu i źródła zasilania. SmartBond TINY jest niezwykle energooszczędny, uzyskując rekordowy wynik wydajności. Dostępny w bardzo małej obudowie WLCSP17 2,0×1,7×0,328 mm – jest o połowę mniejszy od swojego poprzednika lub jakiejkolwiek oferty innych wiodących producentów. Uzupełnia go elastyczny SDK, obsługujący główne kompilatory, takie jak Keil i GCC.



Rysunek 5. Schemat blokowy układu SmartBond TINY DA14531 firmy Dialog Semiconductor [15]

W układzie DA14531 zastosowano rdzeń ARM CortexM0+ (16 MHz) z pamięcią RAM 48 kB, ROM 144 kB oraz OTP 32 kB (**rysunek 5**). Wybrane parametry układu:

- Rekordowy wynik 18300 w EEMBC IoTMark-BLE;
- Typowy czas rozruchu do uruchomienia radia 35 ms;
- Jednoczesna obsługa 3 transmisji BLE;
- Programowana moc wyjściowa w zakresie od –20 dBm do +2,5 dBm;
- Czułość odbiornika –94 dBm;
- Napięcie zasilania 1,1...3,3 V;
- Maksymalny prąd odbiornika 2,2 mA, 3 V (typ.);
- Maksymalny prąd nadajnika 3,5 mA dla 0 dBm (typ.);
- Prąd: w stanie głębokiego uśpienia 240 nA (25°C);
- Moduł kryptograficzny AES128, generator TRNG;
- Cechy unikalne: Bardzo mała obudowa WLCSP17 2,0×1,7×0,328 mm.

Dostępny jest firmowy moduł DA14531 SmartBond TINYTM Module o rozmiarach 12,5×14,5 mm. Zawiera układ scalony DA14531, oscylator kwarcowy, pamięć Flash, elementy pasywne oraz antenę.

SmartBond DA1469x

Rodzina SmartBond DA1469x firmy Dialog to najbardziej zaawansowane i bogate w funkcje wielordzeniowe mikrokontrolery do łączności bezprzewodowej [16].

Jako pierwsze bezprzewodowe MCU w produkcji oparte na procesorze ARM Cortex-M33, produkty DA1469x oferują programistom większą moc obliczeniową do wymagających aplikacji, takich jak zaawansowane urządzenia monitorujące kondycję, zaawansowane urządzenia inteligentnego domu i kontrolery gier wirtualnej rzeczywistości.

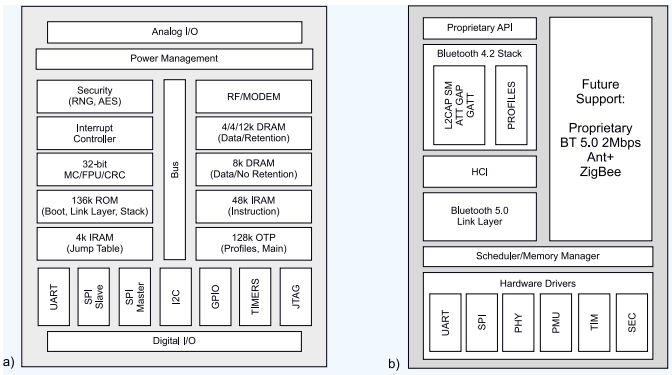
Układy są wyposażone w kontroler czujników SNC (*Sensor Node Controller*), który działa autonomicznie i niezależnie przetwarza dane z czujników, podłączonych do jego interfejsów.

Rodzina DA1469x zawiera najnowocześniejszy moduł zarządzania energią, który wykorzystuje najlepsze w swojej klasie rozwiązania, kontrolując różne rdzenie przetwarzające i aktywując je tylko w razie potrzeby, jednocześnie eliminując potrzebę oddzielnego PMIC i zmniejszając całkowity rozmiar systemu.

W układzie DA14699 zastosowano rdzeń aplikacyjny ARM CortexM33F (32 kHz do 96 MHz) z pamięcią RAM 512 kB, OTP 4 kB, ROM 128 kB, rdzeń komunikacyjny ARM CortexM0+ oraz dedykowany rdzeń mikroDSP (Sensor Node Controller) (**rysunek 6**).

- 144 Dhrystone MIPS, CoreMark 3,574 CM/MHz;
- Programowana moc wyjściowa w zakresie od –18 dBm do +6 dBm;

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 7. Układ EM9304 firmy EM Microelectronic: a) architektura sprzętowa; b) architektura programowa [10]

- Czułość odbiornika –97 dBm;
- Napięcie zasilania 2,4...4,75 V;
- Maksymalny prąd odbiornika 1,8 mA (typ.);
- Maksymalny prąd nadajnika 3 mA (typ.);
- Moduł kryptograficzny AES128, SHA1, SHA256, SHA512, generator TRNG (FIPS 1402);
- Cechy unikalne: Układ zarządzania zasilaniem (PMU) z obsługą ładowania akumulatorów.

EM MICROELECTRONIC

Układ EM9304 z rdzeniem ARCv2

Układ scalony EM9304 to mały, energooszczędny układ scalony (SoC), zoptymalizowany pod kątem produktów obsługujących technologię Bluetooth 5.0 o niskim zużyciu energii [10]. Zastosowano w nim 32-bitowy rdzeń ARCv2 EM4 (24 MHz), z pamięcią RAM (instrukcje 48 kB, dane 28 kB), ROM 136 kB oraz OTP 128 kB (**rysunek 7**). Wybrane parametry układu:

- Programowana moc wyjściowa w zakresie od –34 dBm do +6,1 dBm;
- Czułość odbiornika –94 dBm;
- Moduł kryptograficzny AES128, generator TRNG oraz moduł generowania klucza (ESSP256);
- Maksymalny prąd odbiornika 3,0 mA (typ.);
- Maksymalny prąd nadajnika 5,2 mA dla 0,4 dBm (typ.);
- Prąd: w stanie pracy od 1,0 µA, uśpienia 650 nA oraz wyłączenia 5 nA;
- Cechy unikalne: rdzeń ARCv2 EM4.

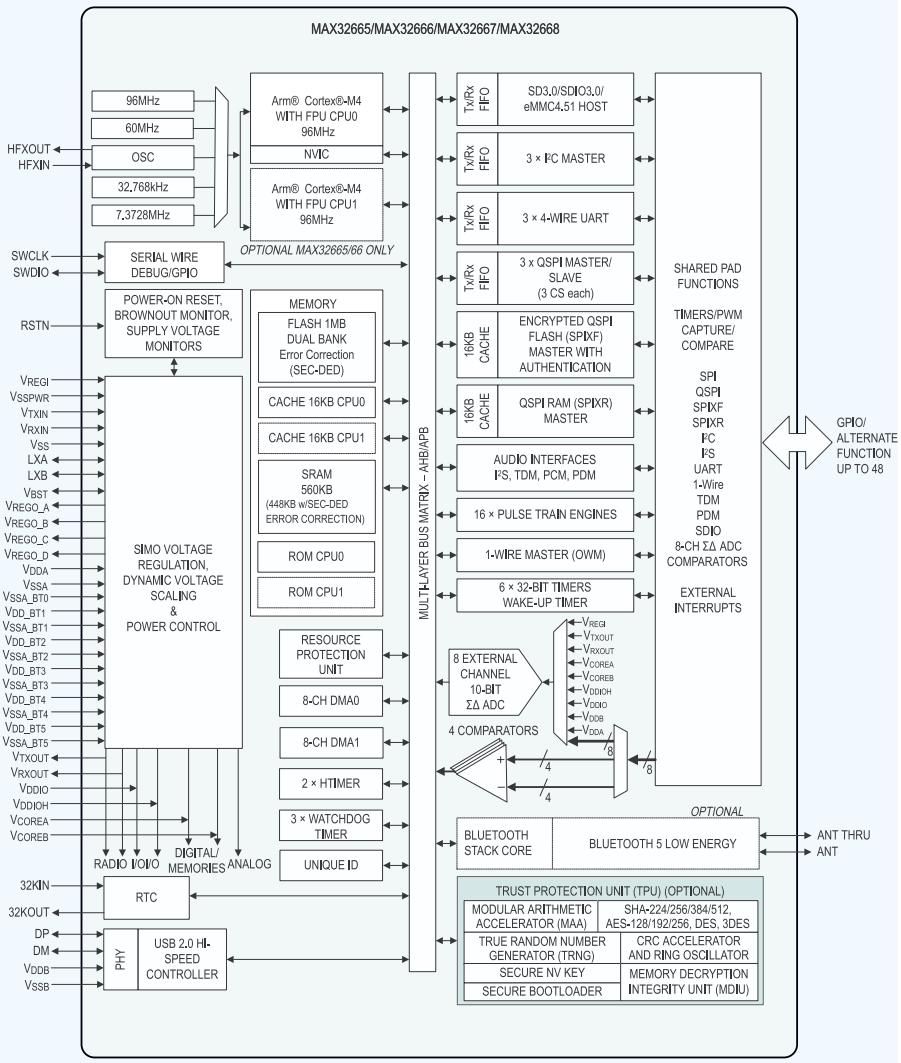
Architekturę sprzętową układu EM9304 pokazuje rysunek 7a. Układ zawiera moduł FPU oraz koprocesor CRC. Pamięć jest podzielona na wiele domen zasilania. Elastyczna architektura EM9304 pozwala mu działać jako towarzyszący układ scalony, dla dowolnego produktu opartego na układzie ASIC lub MCU albo jako kompletny układ SoC. Aplikacje niestandardowe mogą być uruchamiane z pamięci jednorazowo programowalnej (OTP), a urządzenia peryferyjne cyfrowe (SPI lub I²C) mogą być używane do łączenia się z urządzeniami zewnętrznymi, takimi jak czujniki, pamięć, wyświetlacz lub sterowniki dotykowe. Jednostka zmiennoprzecinkowa może zostać wykorzystana do implementacji zaawansowanych algorytmów, takich jak fuzja czujników.

Z kolei architekturę programową układu EM9304 pokazuje rysunek 7b. ROM zawiera warstwę łącza Bluetooth 5.0 z interfejsem kontrolera hosta (HCI), stosem Bluetooth z zastrzeżonym interfejsem kontrolera aplikacji (ACI), kilkoma profilami i procedurami aktualizacji oprogramowania sprzętowego drogą bezprzewodową (FOTA). Energooszczędny kontroler Bluetooth i host można skonfigurować do obsługi do ośmiu jednoczesnych połączeń. Obsługiwane są również bezpieczne połączenia i zwiększona długość pakietu.

EM9304 zawiera wyrafinowany system zarządzania energią na chipie z automatyczną konfiguracją dla akumulatorów 1,5 V lub 3 V. Bieżące zużycie jest zminimalizowane we wszystkich trybach aplikacji, przy użyciu wydajnego harmonogramu i menedżera pamięci. Kilka opcji konfiguracji pamięci zapewnia optymalną wydajność dla dowolnej aplikacji. Stabilny, energooszczędny oscylator uśpienia (RC lub kryształ) minimalizuje zużycie energii w stanie pracy.

EM9304 wyposażony jest w najnowocześniejszy moduł radiowy 2,4 GHz: odbiornik o bardzo małej mocy z doskonałą czułością/selektywnością oraz programowalny nadajnik, zapewniający optymalną moc wyjściową i pobór prądu. Układ oferowany jest w obudowach: WLCSP25 (rozmiaru wafla 2,3×2,2 mm), QFN28 (4×4 mm) lub w postaci samej matrycy/wafla.

Układ EM9304 zastosowano na płytce ewaluacyjnej EVALADICUP3029 firmy Analog Devices, zaprojektowanej z myślą o aplikacjach IOT. Pracuje tam razem z ultraenergooszczędnym procesorem ADuCM3029 tej firmy.



Rysunek 8. Schemat blokowy układów MAX32665, MAX32666, MAX32667, MAX32668 rodziny Dawin firmy Maxim Integrated [18]

eprasa.pl 85168ce91e

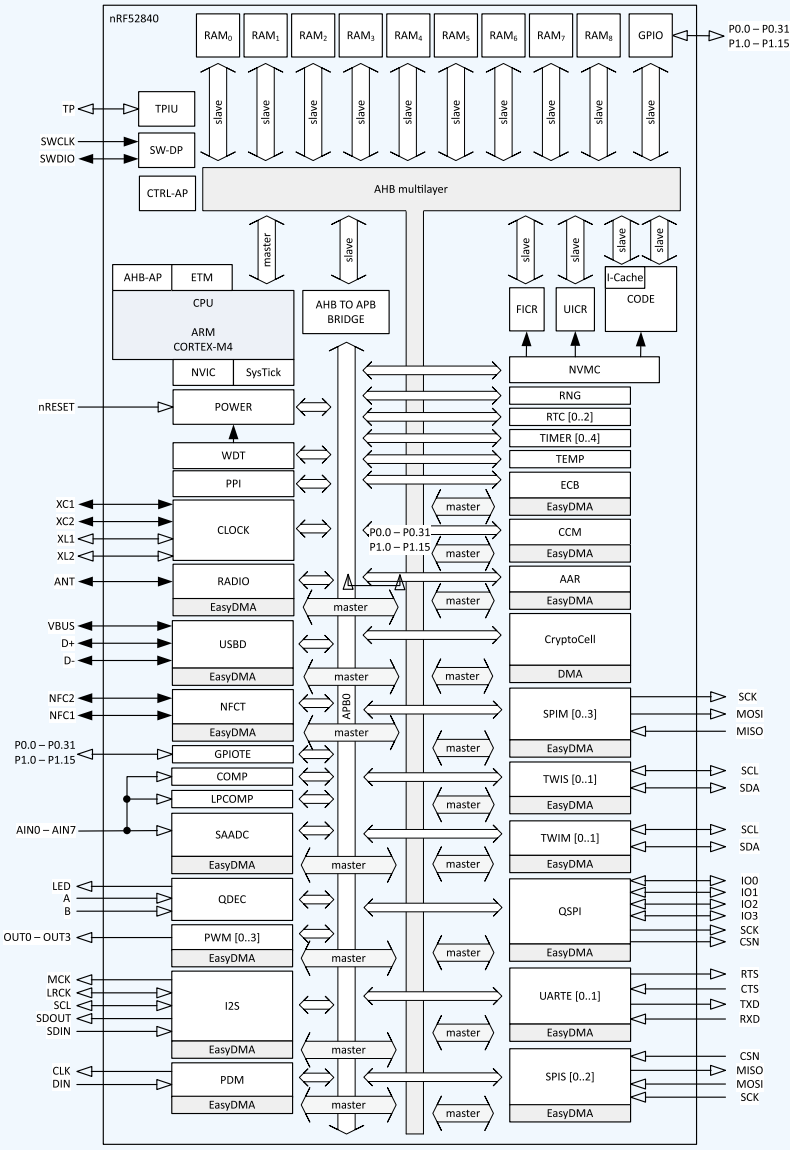
MAXIM INTEGRATED

Układ MAX32666 z rodziny Darwin

Rodzina DARWIN firmy Maxim Integrated to nowy rodzaj mikrokontrolerów IoT o bardzo niskim poborze mocy, stworzonych z myślą o rozwoju w szybko rozwijającym się Internecie Rzeczy (IoT). Są inteligentne, mają największe pamięci w swojej klasie i skalowalną architekturę. Wykorzystują modułowy akcelerator arytmetyczny (MAA) ze sprzętowym źródłem entropii dla zaawansowanych funkcji bezpieczeństwa (AES, ECDSA, RSA, DSA, TRNG), dostarczając jednocześnie obsługę bezpiecznego bootowania. Poziom bezpieczeństwa jest porównywalny z poziomem stosowanym przez instytucje finansowe i rządowe [18].

Mikrokontrolery MAX32665...MAX32668 są zaawansowanymi układami SoC, wyposażonymi w procesor ARM CortexM4F, do wydajnego obliczania złożonych funkcji i algorytmów, ze zintegrowanym zarządzaniem energią (**rysunek 8**). Obejmują najnowszą generację modułu Bluetooth 5 Low Energy o wysokiej przepustowości (2 Mb/s) oraz najlepszy w swojej klasie firmowy sprzętowy moduł zabezpieczeń TPU (Trust Protection Unit). Urządzenia oferują dużą wbudowaną pamięć Flash 1 MB i do 560 kB SRAM, którą można skonfigurować jako 448 kB SRAM z kodowaniem korekcji błędów (ECC). Podzielone banki pamięci Flash, po 512 kB każdy, obsługują bezproblemową aktualizację bezprzewodową, dodając dodatkowy stopień niezawodności. Skalowalność pamięci danych (SRAM) i przestrzeni kodu są obsługiwane przez dwa interfejsy SPI typu executeinplace (SPIX).

Dobrym przykładem jest układ MAX32666 z dwoma rdzeniami ARM CortexM4F (96 MHz). Zapewnia wydajność 27,3 µA/MHz dla 3,3 V, przy wykonaniu kodu z pamięci Cache. W stanie uśpienia z podtrzymaniem pamięci pobiera 10 µA. Moduł radiowy BLE 5.2 ma czułość odbiornika –95 dBm i moc nadajnika do +4,5 dBm.



Rysunek 9. Schemat blokowy układu nRF52840 firmy Nordic Semiconductor [20]

MICROCHIP

Firma Microchip oferuje bardzo rozbudowany wachlarz mikrokontrolerów przydatnych dla IoT. Oferuje też wiele układów radiowych do obsługi protokołów: Wi-Fi, Bluetooth, LoRa i ZigBee [19]. Układy radiowe to modemy, z interfejsem ASCII lub binarnym. Zalecane przez producenta rozwiązania dla IoT to w zasadzie długa lista modułów uruchomieniowych, integrujących te poszczególne układy. Do obsługi protokołu Bluetooth 5.0 firma poleca 5 modułów modemowych typu SOM. Choć lista układów scalonych z obsługą protokołu Bluetooth zawiera 16 pozycji, to wgląd w dokumentację układów i modułów pokazuje jednak, że obsługiwany jest standard Bluetooth 4.2. Brak tu układów SoC przeznaczonych dla IoT.

NORDIC SEMICODUCTOR

Sukces firmy Nordic Semiconductor rozpoczął się od układów SoC rodziny nRF51 [20]. Obecnie najbardziej rozbudowana jest rodzina nRF52, ale pojawił się pierwszy procesor nowej rodziny nRF53 (**tabela 1**). Wszystkie urządzenia tej firmy są obsługiwane przez kwalifikowane, wysokowydajne stosy oprogramowania klasy produkcyjnej.

Tabela 1. Obsługa protokołów transmisji bezprzewodowej rodzin nRF52 i nRF53 firmy Nordic Semiconductor [20]

	NRF52805	NRF52810	NRF52811	NRF52820	NRF52832	NRF52833	NRF52840	NRF5340
Wykrywanie kierunku			Tak	Tak		Tak		Tak
2 Mbps	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Nowy wybór kanałów	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Rozszerzone rozgłaszanie			Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Długi zasięg			Tak	Tak		Tak	Tak	Tak
Bluetooth Mesh				Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
ZigBee				Tak		Tak	Tak	Tak
Thread			Tak	Tak		Tak	Tak	Tak
NFC					Tak	Tak	Tak	Tak

eprasa.pl 85168ce91e

Układ nRF52840

Układ scalony SoC typu nRF52840 ma rdzeń ARM Cortex-M4F (64 MHz) z dużą pamięcią Flash do 1 MB i pamięci RAM do 256 kB [20] (**rysunek 9**). Wybrane parametry układu:

- Umożliwia transmisję w pasmie 2,4 GHz, w sieciach z protokołem Bluetooth 5, Thread, ZigBee, IEEE 802.15.4 oraz ANT;
- Możliwa jest jednoczesna obsługa transmisji z obsługą stosu BLE 5 oraz stosu OpenThread. Zapewnia to mechanizm Dynamic Multiprotocol;
- Programowana moc wyjściowa w zakresie od –20 dBm do +8 dBm;
- Zapewnia bezpieczne bootowanie oraz aktualizację oprogramowania poprzez radio;
- Może pracować z różnymi systemami RTOS włącznie z systemem FreeRTOS;
- Pracuje z napięciem zasilania 1,7...5,5 V;
- Cechy unikalne: układy rodziny nRF52x mają dedykowany moduł kryptograficzny ARM CryptoCell 310 oraz TrustZone.

Firma Nordic Semiconductor udostępnia zestaw uruchomieniowy nRF52840-DK [44], wtyczkę *nRF52840 Dongle* [48] oraz zestaw czujnikowy (IoT) Nordic Thingy [49] z czujnikami: temperatury, wilgotności, ciśnienia, jakości powietrza, koloru i poziomu oświetlenia, dwoma czujnikami ruchu. Dostępnych jest bardzo wiele modułów produkcyjnych różnych producentów z układami serii nRF52. Umożliwia to bardzo łatwe i szybkie prototypowanie.

Zupełnie nietypowo układ nRF 52840 został zastosowany jako podstawowy procesor płytek Arduino Nano 33 BLE oraz Arduino Nano 33 BLE Sens z czujnikami temperatury, ciśnienia, wilgotności, oświetlenia, koloru, ruchu oraz gestów.

Moduł SiP z układem nRF52840

Moduł HJ-840 chińskiej firmy Tangshan Hongjia Electronic Technology został wykonany w technologii SiP [21]. W obudowie o wymiarach 6,2×7×0,9 mm i wadze 0,3 g został zamieszczony układ scalony nRF52840 firmy Nordic Semiconductor. Wbudowana antena dalekiego zasięgu o wysokiej wydajności pozwala osiągnąć zasięg w otwartej przestrzeni od 50 do 80 m (moc TX 0 dBm, 1 Mb/s). Możliwa jest także obsługa anteny zewnętrznej. Moduł jest przystosowany do pracy w zakresie temperatur od –40 do 105°C.

nRF5340 firmy Nordic Semicoductor – pierwszy procesor komunikacyjny SOC z dwoma rdzeniami ARM Cortex-M33

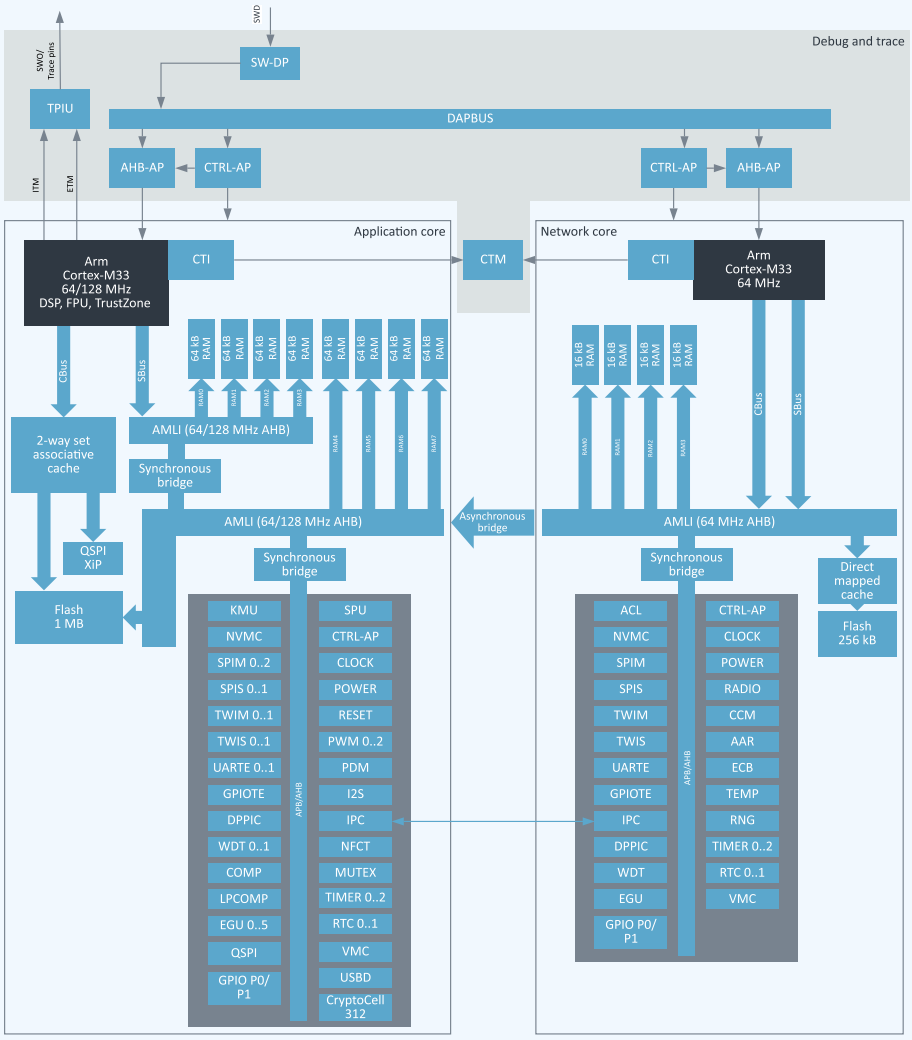
Unikalną cechą układu nRF5340 jest zastosowanie jako rdzeń aplikacyjny i komunikacyjny dwóch takich samych rdzeni ARM Cortex-M33 oraz możliwość pracy do temperatury 105°C [5]. Schemat blokowy procesora nRF5340 jest pokazany na **rysunku 10**.

Rdzeń aplikacyjny ARM Cortex-M33 zapewnia energooszczędną arytmetykę (DSP), obliczenia zmiennoprzecinkowe (FPU), kontroler przerwań (NVIC) oraz moduł ochrony pamięci (MPU). Może pracować z obniżoną częstotliwością zegara ze 128 MHz do 64 MHz (przy użyciu skalowania napięcia i częstotliwości), co pozwala na zmniejszenie mocy zasilania (510/255 CoreMark, 65/76 CoreMark/mA). Rdzeń aplikacyjny ma zastosowaną najnowszą technologię ARM TrustZone oraz ARM CryptoCell 312. Technologia ARM TrustZone oznacza, że moduł ma obszary zabezpieczone oraz niezabezpieczone. Aspekty krytyczne, jak obsługa kryptograficzna i klucze, mogą być umieszczone w obszarze zabezpieczonym, do którego nie ma bezpośredniego dostępu. Zapewnia to najwyższy poziom szyfrowania i zabezpieczeń aplikacyjnych na rynku. Obie technologie zapewniają również bardzo energooszczędną pracę.

Rdzeń komunikacyjny (network) ARM Cortex-M33 jest przeznaczony do obsługi komunikacji radiowej i jest w pełni programowalny. Jest zoptymalizowany pod kątem niskiej mocy i wydajności (238 CoreMark, 101 CoreMark/mA). Rdzeń komunikacyjny ma dołączony koprocesor kryptograficzny do wykonywania w locie operacji zgodnych z 128-bit AES/ECB/CCM/AAR.

Układ udostępnia 48 wyprowadzeń GPIO (w obudowie 7×7 mm aQFN94), cztery zegary RTC (24b), 6 timerów (32b), przetwornik ADC (12b, 200 ksps), interfejs mikrofonu cyfrowego (PDM), cztery wyjścia PWM, port I²S, cztery porty UART, trzy porty I²C oraz cztery porty SPI. Port QSPI (96 MHz) umożliwia wykonywanie kodu z dołączonej zewnętrznej pamięci Flash. Umożliwia jednoczesną (*concurrent*) pracę w jednej sieci z protokołem Bluetooth LE oraz w drugiej sieci typu Mesh z protokołem Bluetooth Mesh, Thread lub ZigBee.

Układ scalony nRF5340 firmy Nordic Semiconductor jest zbudowany z zastosowaniem rdzenia aplikacyjnego ARM Cortex-M33F (128/64 MHz) z pamięcią Flash do 1 MB i RAM do 512 kB oraz 8 kB 2-drożnej asocjacyjnej pamięci podręcznej. Drugi rdzeń komunikacyjny ARM Cortex-M33 (64 MHz) z pamięcią Flash do 256 kB oraz RAM 64 kB [5] (rysunek 10). Wybrane parametry układu:

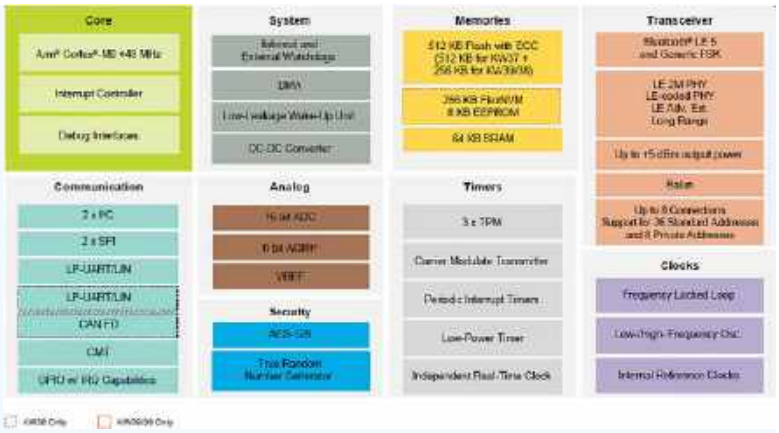


Ryunek 10. Schemat blokowy procesora nRF5340 [5]

eprasa.pl 85168ce91e

- Umożliwia transmisję w pasmie 2,4 GHz, w sieciach z protokołem Bluetooth 5.2, Bluetooth Mesh, Thread, ZigBee, IEEE 802.15.4 oraz ANT i firmowym;
- Czułość odbiornika –97,5 dBm (1 Mbps);
- Programowana moc wyjściowa w zakresie od –20 dBm do +3 dBm;
- Napięcie zasilania 1,7...5,5 V;
- Maksymalny prąd odbiornika 2,6 mA (1 Mbps);
- Maksymalny prąd nadajnika 3,2 mA (0 dBm);
- Prąd: w stanie głębokiego uśpienia 1,1 µA; włączony RTC podtrzymanie pamięci 64 ckB 1,8 µA;
- Dedykowany moduł kryptograficzny ARM CryptoCell – 312 oraz TrustZone, SKU, KMU i ACL, AES 128;
- Zapewnia bezpieczne bootowanie oraz aktualizację oprogramowania poprzez radio;
- Może pracować z systemem operacyjnym czasu rzeczywistego Zephyr;
- Cechy unikalne: zastosowanie jako rdzeń aplikacyjny i komunikacyjny dwóch takich samych rdzeni ARM Cortex-M33 oraz możliwość pracy do temperatury 105°C.

Firma udostępnia zestaw uruchomieniowy nRF5340-PDK [47].



Rysunek 11. Schemat blokowy układu KW39 firmy NXP [23]

NXP

Firma NXP oferuje wiele układów SoC dla IoT z obsługą komunikacji bezprzewodowej ze standardem Bluetooth, ZigBee, Thread, Wi-Fi oraz w pasmie Sub 1-GHz. Bardzo ciekawą propozycją jest kompleksowa platforma przetwarzania krawędziowego i bezpieczeństwa EdgeVerse z portfolio zabezpieczeń EdgeLock i rodziną układów scalonych SE050 (i wiele innych).

Oferta firmy dramatycznie się zmieniła po przejęciu w grudniu 2019 działu „Wi-Fi and Bluetooth/BLE combo" firmy Marvell. Portfolio firmowe zwiększyło się o 263 pozycje. Firma NXP rozszerzyła swoją ofertę łączności bezprzewodowej, oferując swoim klientom pełną gamę rozwiązań łączonych Wi-Fi i Bluetooth/BLE wraz z flagowymi platformami obliczeń krawędziowych i dedykowanymi mikrokontrolerami dla IoT.

Układy KW39/38/37

Nowe układy SoC rodziny KW39/38/37 firmy NXP zostały zaprojektowane z wykorzystaniem sprzętu i oprogramowania klasy motoryzacyjnej i przemysłowej, a także solidnej komunikacji szeregowej z urządzeniami peryferyjnymi CAN-FD. Nowe urządzenia idealnie nadają się do zastosowań motoryzacyjnych, takich jak dostęp bezkluczykowy, czujniki i bezprzewodowe funkcje diagnostyczne na pokładzie. Ponadto umożliwiają zastosowania przemysłowe, takie jak sterowanie i monitorowanie budynków, ochrona przeciwpożarowa, domowa i instytucjonalna opieka zdrowotna oraz szereg innych zastosowań przemysłowych.

Układy cechują się ekstremalną czułością odbiornika (do –105 dBm), który pomaga zapewnić duży zasięg komunikacji BLE i wysoką odporność na zakłócenia. Ponadto radio obsługuje do 8 jednoczesnych bezpiecznych połączeń w dowolnej kombinacji master/slave, umożliwiając wielu autoryzowanym użytkownikom komunikację z urządzeniem. **Innowacyjny bufor strumienia danych MCU umożliwia przechwytywanie danych komunikacji radiowych bez zatrzymywania procesora lub operacji DMA**, pozwalając na bardzo dokładne pomiary potrzebne do detekcji kątowej. Układy różnią się drobnymi zmianami rodzaju/rozmiaru pamięci Flash i RAM oraz dodaniem obsługi CAN FD (KW38).

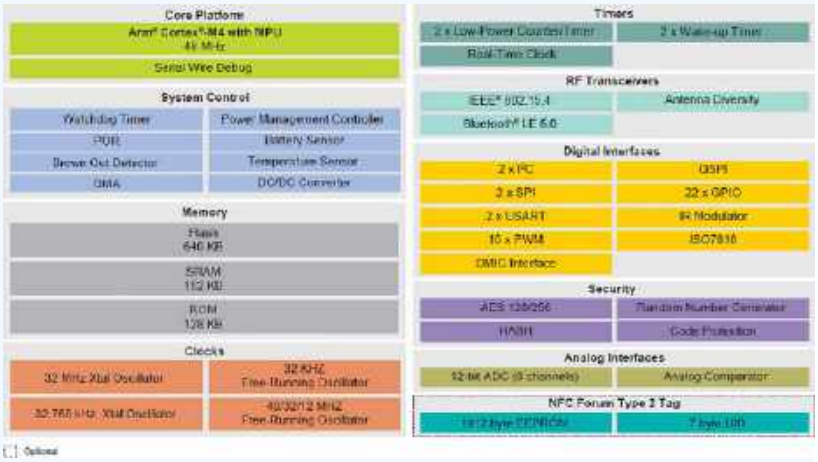
Układ scalony KW39 firmy NXP ma zastosowany rdzeń ARM Cortex-M+ (48 MHz), Flash 256 kB (oraz FlexNVM 256 kB), SRAM 64 kB oraz FlexRAM 8 kB [23] (**rysunek 11**). Wybrane parametry układu:

- Obsługuje protokoły transmisji Bluetooth Low Energy 5.0, IEEE 802.15.4, Thread oraz ZigBee 3.0;
- Programowana moc wyjściowa w zakresie od –30 do +5 dBm;
- Czułość odbiornika; BLE: –95,5dBm (2 Mb/s), –105 dBm (125 kb/s); IEEE 802.15.4: –101 dBm (250 kb/s);
- Napięcie zasilania 1,71...3,6 V;
- Maksymalny prąd odbiornika 6,3 mA (typ.);
- Maksymalny prąd nadajnika 5,7 mA dla 0 dBm (typ.);
- Prąd: w stanie głębokiego uśpienia 266,6 nA;
- Moduł kryptograficzny AES-128 z LTC, TRNG, 80b unikalny numer identyfikacyjny, 40b unikalny adres MAC;
- Cechy unikalne:
  - Obsługa sprzętowa do 8 bezpiecznych połączeń BLE;
  - Kwalifikacja samochodowa AEC-Q100 Grade 22 i kwalifikacje przemysłowe zapewniające wyjątkową trwałość i wydajność w zastosowaniach krytycznych dla bezpieczeństwa.

Układ K32W061

Układ typu K32W061 jest przeznaczony do zasilania następnej generacji ultraniskoprądowych, wieloprotokołowych urządzeń bezprzewodowych, obsługujących protokoły ZigBee, Thread, IEEE 802.15.4 oraz Bluetooth Low Energy 5.0 oraz NFC. Układ oferuje wiele trybów niskiego poboru mocy oraz bardzo małe zużycie energii TX i RX. Ma zastosowany rdzeń ARM Cortex-M4 (12 do 48 MHz), Flash 640 kB, RAM 128 kB [22] (**rysunek 12**). Wybrane parametry układu:

- Obsługuje protokoły transmisji Bluetooth Low Energy 5.9, IEEE 802.15.4, Thread oraz ZigBee 3.0;
- Programowana moc wyjściowa w zakresie do +11 dBm;
- Czułość odbiornika –97 dBm (BLE), –100 dBm (IEEE 802.15.4);
- Napięcie zasilania 1,9...3,6 V;
- Maksymalny prąd odbiornika 4,3 mA (typ.);
- Maksymalny prąd nadajnika 7,4 mA dla 0 dBm (typ.);



Rysunek 12. Schemat blokowy układu K32W61 firmy NXP [22]

eprasa.pl 85168ce91e

- Prąd: w stanie głębokiego uśpienia 350 nA;
- Moduł kryptograficzny AES-128, SHA1, SHA-256 oraz generator TRNG;
- Cechy unikalne – możliwość automatycznego przełączania pomiędzy dwiema antenami.

Układ 88W9098 z rdzeniem i.MX z obsługą Wi-Fi 6 oraz Bluetooth 5.1

Firma NXP oferuje układy SoC Wi-Fi oraz Bluetooth z obsługą Wi-Fi 6 (802.11.ax) oraz specyfikacjami 802.11n/ac dla bram, punktów dostępowych, aplikacji motoryzacyjnych (auto) i konsumenckich (IoT). Układy obsługują specyfikację Bluetooth 4,2, 5.0 lub 5.1 Oferowanych jest 16 układów scalonych z rdzeniami i.MX RT lub i.MX. Oprogramowanie pracuje pod systemem operacyjnym RTOS, Linux/Android lub Linux. Dobrym przykładem jest nowy układ combo 88W9098 (typu SoC), który jest pierwszym w branży rozwiązaniem Wi-Fi 6 opartym na najnowszym standardzie IEEE 802.11ax [24] (**rysunek 13**). Dodatkowo ma innowacyjną architekturę dwupasmowego Wi-Fi z jednoczesną obsługą transmisji w obu kanałach oraz obsługę transmisji Bluetooth/BLE 5.1. Układ zapewnia wydajność na poziomie gigabitowym, doskonałą niezawodność i zwiększone bezpieczeństwo.

ON SEMICONDUCTOR

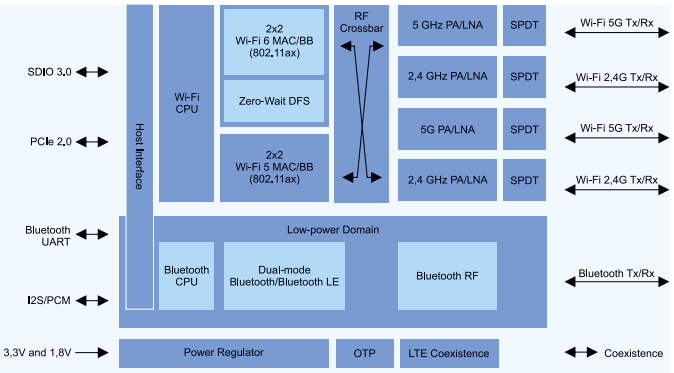
Układ RSL10 – najniższy prąd uśpienia i najlepszy wynik testu EEMBC ULPMark

Firma ON Semiconductor oferuje wiele układów scalonych z obsługą BLE przydatnych do IoT. Układ scalony RSL10 firmy ON Semiconductor to układ SoC oferujący najniższe w branży zużycie energii [25]. Ma zastosowany rdzeń ARM Cortex-M3 (48 MHz) z dużą pamięcią Flash 384 kB i RAM 194 kB [25] (**rysunek 14**). Jako drugi rdzeń układ ma rdzeń LPDSP32 (DSP) przeznaczony do wykonywania złożonych obliczeń w czasie rzeczywistym. Umożliwia on realizowanie aplikacji o dużych wymaganiach obliczeniowych jak kodek audio. Wybrane parametry układu:

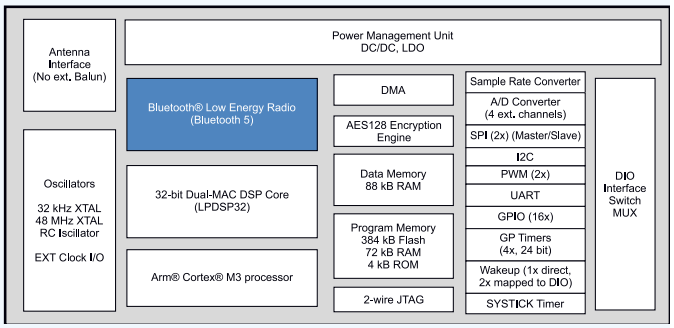
- Obsługuje protokół transmisji BLE 5, IEEE 802.15.4 w pasmie 2,4 GHz;
- Programowana moc wyjściowa w zakresie od –17 do +6 dBm;
- Czułość odbiornika –94 dBm (BLE, 1 Mbps);
- Napięcie zasilania 1,1...3,3 V;
- Maksymalny prąd odbiornika 5,6 mA (1,25 V), 3,0 mA (3 V), (typ.);
- Maksymalny prąd nadajnika 8,9 mA (1,25 V), 4,6 mA (3 V) dla 0 dBm (typ.);
- Striming audio (BW 7 kHz): 0,9 mA RX, 0,9 mA TX;
- Prąd: w stanie głębokiego uśpienia 50 nA (1,25 V), 25 nA (3 V);
- Prąd: w stanie głębokiego uśpienia z podtrzymaniem 8 kB RAM 300 nA (1,25 V), 100 nA (3 V);
- Prąd: w stanie gotowości: 30 µA;
- Moduł kryptograficzny AES-128;
- Cechy unikalne:
  - Najniższe w branży zużycie energii w trybie głębokiego uśpienia (62,5 nW) i odbiornika w trybie odbioru (7 mW);
  - Najlepsze w branży wyniki testu EEMBC ULPMark: 1090 (3 V), 1260 (2,1 V) ULPMark CP;
  - Bardzo niski pobór mocy aplikacji: 1,1 µA dla rozgłaszania BLE w trzech kanałach co 5 s (3 V);
- Wersja układu NCV-RSL10 spełnia kwalifikację samochodową AEC-Q100.

Moduł RSL-10 SiP

Moduł RSL10 SiP firmy ON Semiconductor integruje w jednej obudowie SiP51 o rozmiarach 6×8×1,46 mm strukturę układu RSL10, antenę i wszystkie potrzebne elementy pasywne [25]. Moduł ma certyfikację Bluetooth 5 oraz certyfikację pracy w wielu krajach. Znacząco redukuje to czas i koszt wdrożenia urządzenia do produkcji. Znalazł zastosowanie w systemach IoT wykorzystujących zasilanie z odzyskiwaniem energii (Energy Harvesting), takich jak energia słoneczna oraz mechaniczna (np. przyciski).



Rysunek 13. Architektura układu 88W9098 firmy NXP [24]



Rysunek 14. Schemat blokowy układu RSL10 firmy ON Semiconductor [25]

QORVO

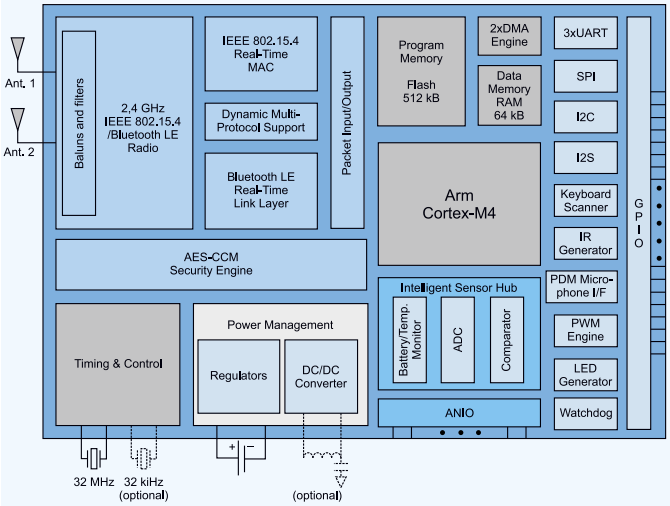
Firma Qorvo dostarcza innowacyjne układy kontrolera bezprzewodowej transmisji danych o ultraniskim poborze mocy, które umożliwiają inteligentne aplikacje domowe i Internet Rzeczy. Układy są zoptymalizowane pod kątem pilotów, inteligentnego domu i urządzeń końcowych, z których każdy ma określone funkcje i potrzeby. Firma dostarcza też układy do obsługi Wi-Fi 6.

Układ QPG6095 – pierwszy SoC obsługujący współbieżność w czasie rzeczywistym

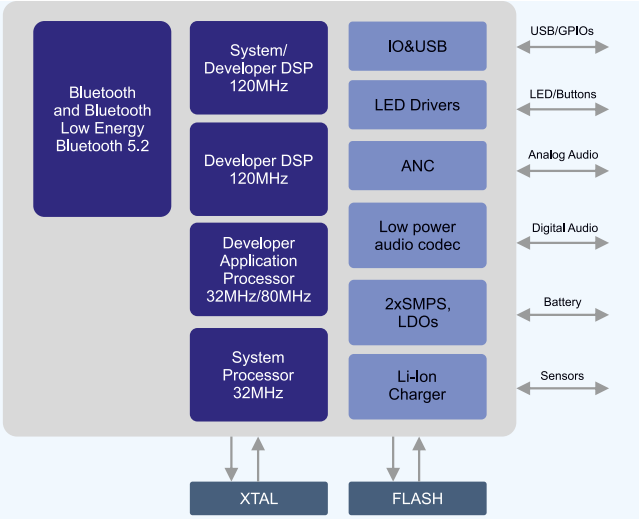
Układ QPG6095 firmy Qorvo to SoC do komunikacji wielokanałowej z protokołem IEEE 802.15.4 (ZigBee/Thread) oraz Bluetooth Low Energy 5.0 [26]. Zintegrowana obsługa wielu stosów i wielu protokołów umożliwia jednoczesną pracę stosów na różnych kanałach, umożliwiając innowacyjne nowe aplikacje łączące obsługę komunikacji ZigBee, Thread i Bluetooth Low Energy w jednym produkcie. Ma zastosowany rdzeń ARM Cortex-M4F (40 MHz) z pamięcią Flash do 512 kB i RAM do 64 kB [26] (**rysunek 15**). Wybrane parametry układu:

- Obsługuje transmisję w pasmie 2,4 GHz z protokołem ZigBee 3.0, Thread oraz Bluetooth 5;
- Sprzętowy moduł obsługi komunikacji standardu IEEE 802.15.4 oraz osobny moduł obsługi BLE 5;
- Sprzętowy moduł kryptograficzny AES 128/256;
- Programowana moc wyjściowa w zakresie do +10 dBm;
- Czułość odbiornika –97 dBm (BLE), –100 dBM (IEEE);
- Napięcie zasilania 1,8...3,6 V;
- Maksymalny prąd odbiornika 4 mA (IEEE), 8,3 (BLE), (typ.);
- Maksymalny prąd nadajnika 11,2 mA dla 0 dBm (typ.);
- Prąd: w stanie gotowości: 1,1 µA;
- Cechy unikalne – sprzętowe wspomaganie umożliwia jednoczesną pracę z komunikacją standardu BLE5, ZigBee i Thread w trzech sieciach z różnymi kanałami.

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 15. Schemat blokowy układu QPG6095 firmy Qorvo [26]



Rysunek 16. Schemat blokowy układu QCC5141 firmy Qualcomm [27]

QUALCOMM

Układy QCC514x – pierwsze SoC gotowe na standard Bluetooth 5.2 LE Audio

Seria QCC5100 firmy Qualcomm została zaprojektowana, aby pomóc producentom w opracowaniu nowej generacji kompaktowych, bogatych w funkcje bezprzewodowych słuchawek dousznych, zestawów słuchawkowych i głośników. Aby sprostać wymaganiom konsumentów dotyczącym jakości dźwięku, a także wydłużonej żywotności baterii i czasu odtwarzania w bezprzewodowych urządzeniach audio, przełomowa seria została zaprojektowana tak, aby zmniejszyć zużycie energii nawet o 65 procent w przypadku połączeń głosowych i strumieniowego przesyłania muzyki w porównaniu z poprzednią jednoukładową technologią rozwiązania audio.

Architektura SoC obsługuje bardzo niskie zużycie energii i obejmuje podwójny tryb radiowy Bluetooth 5, energooszczędny dźwięk i podsystemy aplikacji. Zaprojektowana do obsługi różnych zastosowań konsumenckich „w ruchu", wymagających solidnych, prawdziwie bezprzewodowych doświadczeń o wysokiej jakości, platforma obsługuje takie funkcje, jak Qualcomm TrueWireless stereo, dźwięk Qualcomm aptX HD, Integrated Hybrid Active Noise Cancellation (ANC), głosowe sterowanie interfejsem użytkownika i obsługa asystenta głosowego za pośrednictwem usług w chmurze. Qualcomm wypuścił kolejny chipset audio, QCC514x, do wysokiej klasy bezprzewodowych słuchawek dousznych. Niezwykle energooszczędny układ Bluetooth Audio SoC klasy premium w pakiecie WLCSP został tak zaprojektowany, aby pomóc producentom opracować bardzo małe wkładki douszne, które są wystarczająco wygodne, aby można je było nosić przez cały dzień.

Układ scalony QCC5141 firmy Qualcomm ma zastosowane cztery rdzenie: rdzeń systemowy i rdzeń użytkownika – 2×Qualcomm Kalimba DSP (2...120 MHz) 112 kB (P) + 448 kB (D), rdzeń aplikacyjny (32/80 MHz) oraz rdzeń systemowy (32 MHz) [27] (**rysunek 16**). Wybrane parametry układu:

- Obsługuje protokoły Bluetooth BR, EDR, BLE, Dual-mode, kwalifikowany dla Bluetooth 5.2;
- Zawiera układ zarzadzania energią PMU oraz ładowania akumulatora;
- Zawiera technologię ANC i wzmacniacz audio klasy D;
- Przeznaczony raczej dla producentów urządzeń.

RENESAS

Układy RX23W

Układy serii RX23W firmy Renesas używają firmowego 32- bitowego rdzenia RXv2 w architekturze CISC Harvard. Rdzeń obsługuje operacje DSP (32b MAC) z dzieleniem oraz ma wbudowany 32-bitowy moduł FPU. Firma oferuje też układ RA4W1 z rdzeniem ARM Cortex-M4 o podobnych parametrach. Również bardzo ciekawa jest rodzina mikrokontrolerów RE oparta na technologii procesowej Silicon on Thin Buried Oxide (SOTB), co zapewnia bardzo niski pobór prądu zarówno w trybie aktywnym, jak i w trybie gotowości oraz wysoką prędkość działania procesora (64 MHz) przy niskim napięciu (1,62 V).

Układ R5F523W8BDBL z serii RX23W ma zastosowany firmowy rdzeń RXv2 (54 MHz) z pamięcią Flash do 512 kB i RAM 64 kB [28] (**rysunek 17**). Wybrane parametry układu:

The maximum specifications for the group are shown.

Rysunek 17. Schemat blokowy układu RX23W firmy Renesas [28]

eprasa.pl 85168ce91e

- Wydajność rdzenia 4,33 CoreMark/MHz, 88,56 DMIPS;
- Sprzętowy moduł obsługi komunikacji standardu IEEE 802.15.4 oraz osobny moduł obsługi BLE 5;
- Sprzętowy moduł kryptograficzny AES-CCM 128/256, CRC oraz TRNG;
- Napięcie zasilania 1,8...3,6 V;
- Programowana moc wyjściowa w zakresie do +6 dBm;
- Czułość odbiornika –92 dBm (2 Mbps), –105 dBm (125 kbps);
- Maksymalny prąd odbiornika 3,0 mA (3,3 V), (typ.);
- Maksymalny prąd nadajnika 4,3 mA (3,3 V) dla 0 dBm (typ.);
- Prąd: normalna praca w trybie low-speed 22,3 μA;
- Prąd: w stanie: uśpienia 3 μA, głębokiego uśpienia 2,4 μA (ICLK=32 kHz);
- Wbudowana ładowarka akumulatorów;
- Moduł obsługi panela dotykowych klawiszy (do 36);
- Wspomaganie IEC60730.

SILICON LABORATORIES

W ofercie firmy Silicon Laboratories jest problem z nadmiarem możliwości wyboru. Dodatkowy problem stanowią długie nazwy produktów, gdzie jedna literka/cyferka może oznaczać znaczącą różnicę. Firma oferuje 11 rodzin układów SoC i modułów komunikacyjnych z obsługą protokołu Bluetooth 5/5.1/5.2, BLE i Bluetooth Mesh. Pracują one z rdzeniami ARM Cortex-M33 lub ARM Cortex-M4. Dodatkowo jest dużo układów z obsługą wielu protokołów (w tym Thread) oraz dwóch pasm (Sub 1-GHz).

Rodzina układów Gecko EFR32BG22

Układy SoC rodziny EFR32BG22 (BG22) firmy Silicon Laboratories są częścią platformy Wireless Gecko Series 2, która łączy najlepszą w swojej klasie bardzo niską moc nadawania i odbioru. Wysokowydajny, energooszczędny rdzeń ARM Cortex-M33 zapewnia wiodącą w branży wydajność energetyczną, która może wydłużyć żywotność baterii pastylkowej do dziesięciu lat. Docelowe aplikacje obejmują węzły Bluetooth o niskim poborze mocy, inteligentne zamki do drzwi, osobiste urządzenia medyczne i fitness. Znaczniki śledzenia zasobów, światła ostrzegawcze i nawigacja w pomieszczeniach również korzystają z funkcji wykrywania kierunku o dokładności lokalizacji poniżej jednego metra.

Układ scalony EFR32BG22C224F512IM40 firmy Silicon Laboratories ma zastosowany rdzeń ARM Cortex-M33 (76,8 MHz) z pamięcią Flash 512 kB i RAM 32 kB [29] oraz rdzeń komunikacyjny ARM Cortex-M0+ (**rysunek 18**). Wybrane parametry układu:

- Wydajność rdzenia 27 μA/MHz (76,8 MHz);
- Sprzętowy moduł kryptograficzny AES-ECC 128/256, SHA-1, SHA-2, ECDSA, ECDH, CRC, RTSL, TRNG oraz ARM TrustZone;
- Napięcie zasilania 1,71...3,8 V;
- Programowana moc wyjściowa w zakresie do +6 dBm;
- Czułość odbiornika –96,2 dBm (1 Mbps), –106,7 dBm (125 kbps);
- Maksymalny prąd odbiornika 2,5 mA (typ.);
- Maksymalny prąd nadajnika 3,4 mA dla 0 dBm (typ.);
- Prąd w stanie: głębokiego uśpienia 1,4 μA (podtrzymanie 32 kB RAM i praca RTC);
- Układ obsługuje transmisję w pasmie 2,4 GHz z protokołem Bluetooth 5.2 oraz Bluetooth Mesh;
- Zwraca uwagę bardzo długa lista układów peryferyjnych;
- Cechy unikalne – Bluetooth 5.1 Direction Finding.

Moduły SiP BGM220P/BGM220S

Moduły SiP BGM220P i BGM220S Wireless Gecko firmy Silicon Labs są zbudowane z zastosowaniem układu EFR32BG22 SOC. Przy rozmiarach 6×6×1,1 mm i wbudowanej antenie (lub z gniazdkiem LEXO) stanowią kompletne rozwiązanie pozwalające na pracę układu IoT przez 10 lat z baterii CR2354 [29].

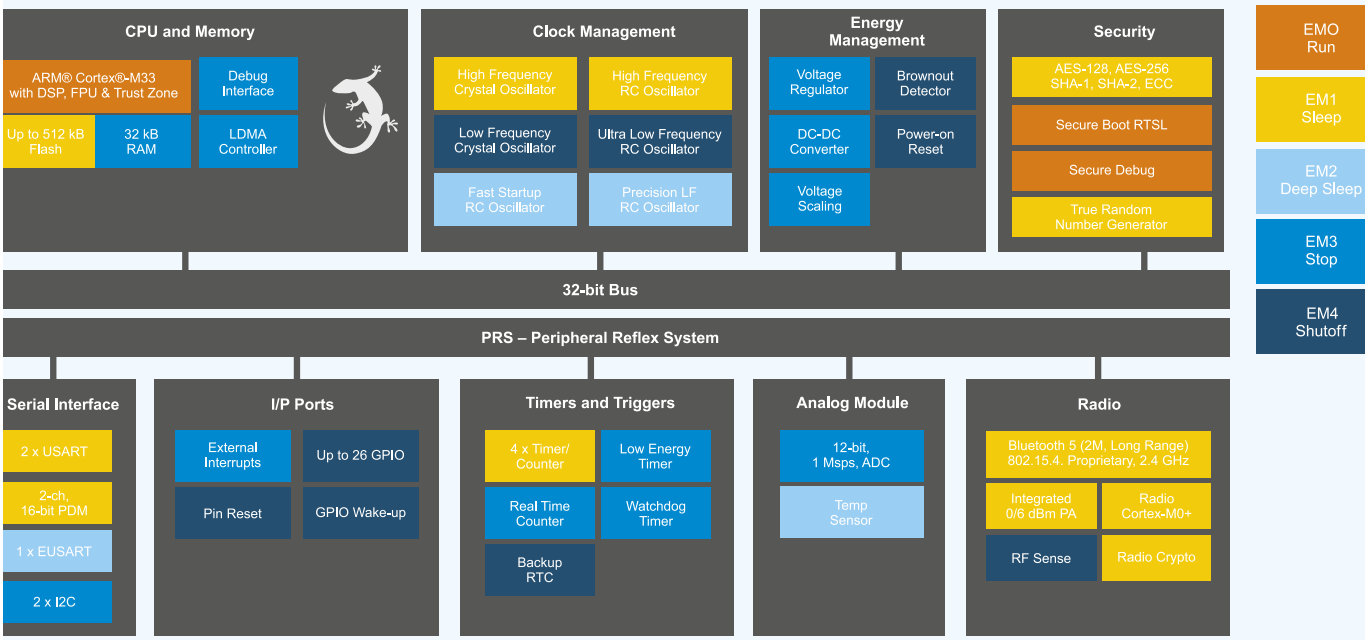
ST MICROELECTRONICS

Seria układów SoC STM32WB

Seria STM32WB firmy ST Microelectronics obsługuje Bluetooth LE 5.0, Bluetooth Mesh i IEEE 802.15.4 (ZigBee i Thread). Może obsługiwać dwa protokoły współbieżnie (Bluetooth LE i ZigBee, Bluetooth LE i OpenThread). Dzięki szerokiemu i łatwemu w użyciu systemowi seria STM32WB oferuje certyfikowane, bezpłatne stosy radiowe. Funkcje bezpieczeństwa STM32WB zapewniają niezawodność urządzenia końcowego i funkcje zapobiegające klonowaniu.

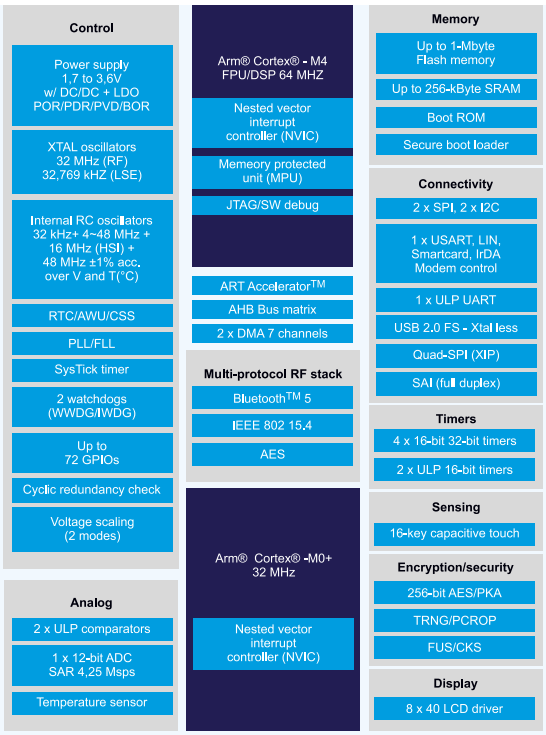
Układ scalony STM32WB55VG firmy ST Microelectronics ma zastosowany rdzeń ARM Corte-M4F (64 MHz) z pamięcią Flash do 1 MB oraz RAM do 256 kB. Drugi rdzeń ARM Cortex-M0+ (32 MHz) jest polecany do obsługi modułu radiowego [30] (**rysunek 19**). Wybrane parametry układu:

- Wydajność rdzenia ARM Corte-M4F 1.25 DMIPS/MHz (Drystone 2.1), 219.48 CoreMark (3.43 CoreMark/MHz dla 64 MHz), 303 ULPMark CP score, <53 μA/MHz;
- Układ obsługuje dwa protokoły transmisji Bluetooth Low Energy 5 oraz IEEE 802.15.4 z protokołem Thread oraz ZigBee 3.0 z możliwością ich jednoczesnej obsługi (z podziałem czasowym);



Rysunek 18. Schemat blokowy układu SoC rodziny EFR32BG22 firmy Silicon Labs [29]

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 19. Schemat blokowy układu STM32WB55VG firmy ST Microelectronics [30]

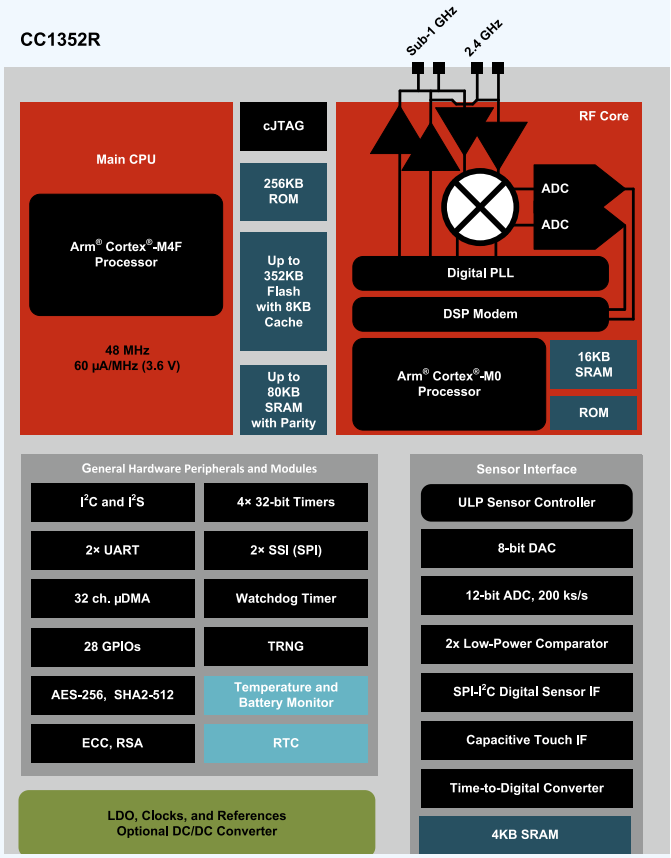
- Programowana moc wyjściowa w zakresie do 6 dBm;
- Czułość odbiornika –96 dBm (1 Mbps), –100 dBm (IEEE);
- Napięcie zasilania 1,71...3,6 V;
- Maksymalny prąd odbiornika 2,5 mA (typ.);
- Maksymalny prąd nadajnika 3,4 mA dla 0 dBm (typ.);
- Prąd w stanie: wyłączenia 13 µA, oczekiwania 600 nA (podtrzymanie 32 kB RAM i praca RTC);
- Dwa akceleratory AES (AES hardware accelerator). Obsługują pracę z kluczami o długości 128 i 256 bitów z wieloma trybami pracy (ECB, CBC, CTR, GCM, GMAC, CCM) przy przetwarzaniu bloków danych 128 b i obsłudze algorytmów takich jak: RSA, Diffie-Helman, ECC over GF(p);
- Moduł obliczeń CRC oraz generator TRNG;
- Każdy układ ma unikalny 96-bitowy numer identyfikacyjny;
- Układ zapewnia bezpieczne bootowanie oraz aktualizację oprogramowania poprzez radio;
- Długa lista układów peryferyjnych;
- Cechy unikalne:
  - Zawiera sterownik monochromatycznego pasywnego wyświetlacza LCD mającego do 4 wejść wspólnych oraz do 44 segmentów;
  - Zawiera sterownik Touch sensing controller (TSC) do obsługi panelu dotykowego w technologii pojemnościowej;
  - Niektóre wyprowadzenia układu tolerują wejściowe poziomy napięcia do 5 V przy typowym niskim napięciu zasilaniu układu scalonego.

Układ STM32WB oraz zestaw uruchomieniowy P-NUCLEO-WB55 zostały dokładnie omówione w artykule [39].

TEXAS INSTRUMENTS

Rodzina SimpleLink CC13xx/CC26xx

Platforma SimpleLink firmy Texas Instruments wyznacza nowy standard dla programistów, oferując najszerszą gamę przewodowych i bezprzewodowych mikrokontrolerów SoC w jednym środowisku programistycznym, które zapewnia elastyczne opcje sprzętu, oprogramowania i narzędzi dla Internetu Rzeczy i zastosowań motoryzacyjnych. Platforma bezprzewodowych mikrokontrolerów zapewnia szeroką gamę urządzeń zdolnych do jednoczesnej pracy wieloprotokołowej i koegzystencji układów, umożliwiając tworzenie złożonych systemów IoT przy użyciu jednego lub więcej chipów. Platforma obejmuje 95 układów różnych generacji, z których 23 obsługuje Bluetooth, 5 obsługuje Thread, 11 obsługuje ZigBee, 7 umożliwia pracę wieloprotokołową, 24 umożliwia pracę Sub 1-GHz oraz 28 obsługuje Wi-Fi (**tabela 2**). **Układ scalony SimpleLink CC1352R** firmy Texas Instruments jest układem trójrdzeniowym [4] (**rysunek 20**). Wybrane parametry układu:



Rysunek 20. Schemat blokowy układu CC1352R firmy Texas Instruments [4]

Tabela 2. Obsługa protokołów transmisji bezprzewodowej układów platformy SimpleLink firmy Texas Instruments [4]

Protokół	Rdzeń aplikacyjny	Układy
Bluetooth LE, Thread, ZigBee	ARM Cortex-M4F	CC1352R, CC1352P (dwa pasma: 2,4 GHz, Sub 1-GHz)
Bluetooth LE, Thread, ZigBee	ARM Cortex-M4F	CC1352R, CC1352P, CC2652R, CC2652P, CC2652RB,
Bluetooth LE 5.1	ARM Cortex-M4F	CC1352R, CC1352P, CC2652R, CC2652P, CC2652RB, CC2642R, CC2642R-Q1
	ARM Cortex-M3	CC2640R2L, CC2640R2F-Q1, CC2640R2F
Thread	ARM Cortex-M4F	CC1352R, CC1352P
Sub 1-GHz	ARM Cortex-M4F	CC1352R, CC1352P, CC2652R, CC2652P, CC2652RB
ZigBee	ARM Cortex-M4F	CC1352R, CC1352P, CC2652R, CC2652P, CC2652RB
	ARM Cortex-M3	CC2650, CC2520, CC2520, CC2521, CC2538

eprasa.pl 85168ce91e

- Jako główny rdzeń aplikacyjny został zastosowany rdzeń ARM Cortex-M4F (48 MHz), Cache SRAM 8 kB, RAM 80 kB Flash 352 kB, ROM 256 kB. Wydajność 148 EEMBC CoreMark; 60 µA/MHz;
- Do obsługi modułu radiowego został zastosowany rdzeń ARM Cortex-M0 (48 MHz);
- Trzeci rdzeń pomocniczy Sensor Controller (24 MHz, 4 kB RAM) jest przeznaczony do autonomicznej obsługi układów peryferyjnych;
- Układ może pracować w dwóch pasmach: 2,4 GHz i w pasmie poniżej 1 GHz (Sub-1 GHz);
- Układ umożliwia transmisję z obsługą wielu protokołów: Bluetooth 5.1 Low Energy, IEEE 802.15.4g, 6LoWPAN, Thread, ZigBee, MIOTY, Wireless M-Bus, KNX RF, Wi-SUN oraz autorski protokół EasyLink;
- Programowana moc wyjściowa w zakresie do +14 dBm 24,9 mA (Sub-1 GHz); +5 dBm 9,6 mA (2,4 GHz);
- Czułość odbiornika –105 dBm (BLE 125 kbps), –110 dBm (IEEE 50 kbps), –121 dBm SimpleLink long-range;
- Układ zapewnia bezpieczne bootowanie oraz aktualizację oprogramowania poprzez radio;
- Programowana moc wyjściowa w zakresie do +5 dBm (2,4 GHz) oraz +14 dBm (Sub-1 GHz);
- Układ zawieraa sprzętowy moduł kryptograficzny obsługujący algorytmy AES 128/256, SHA-2 (SHA-224/256/384/512), moduł obliczeń CRC, True Random Number Generator, sprzętowy akcelerator ECC oraz RSA Public Key;
- System operacyjny czasu rzeczywistego: TI-RTOS oraz FreeRTOS;
- Układu pracuje z napięciem zasilania 1,8 V...3,8 V;
- Maksymalny prąd odbiornika 5,8 mA 868 MHz, 6,9 mA 2,4 GHz;
- Maksymalny prąd nadajnika 8,0 mA 868 MHz, 7,1 mA 2,4 GHz; dla 0 dBm (typ.);
- Prąd w stanie: praca 2,9 mA 48 MHz, wyłączenia 150 nA, oczekiwania 850 nA (podtrzymanie 80 kB RAM i CPU, praca RTC);
- Sensor Controller w stanie: praca 808 µA 24 MHz; LP 30,1 µA 24 MHz (pętla nieskończona), 1 µA próbkowanie ADC 1 Hz;
- Bardzo duża liczba modułów peryferyjnych: 12b ADC (200 ksps, 8 ch), UART, SSI, I²C, I²S;
- Cechy unikalne:
  - Obsługa układów peryferyjnych przez trzeci rdzeń bez konieczności budzenia rdzenia głównego;
  - Jednoczesna obsługa transmisji z zastosowaniem dwóch protokołów, np. BLE + Thread (Dynamic Multiprotocol Manager);
  - Układ scalony CC1352R ma osobne wyprowadzenia do obsługi transmisji w paśmie 2,4 GHz oraz w pasmie 868 MHz/915 MHz. Sugeruje to możliwość jednoczesnej pracy w obu pasmach.
  - 100% przenośność kodu aplikacyjnego pomiędzy układami rodziny SimpleLink.

Jest wersja układu CC1352P z dodatkowym wzmacniaczem mocy wyjściowej do +20 dBm, kompatybilnym nóżka w nóżkę z układem CC1352R.

Układ scalony SimpleLink **CC2652RB** firmy Texas Instruments jest pierwszym procesorem, który nie wymaga kwarcu. Układ CC2652RB zawiera wewnętrzny generator BAW (Bulk-Acoustic-Wave) wysokiej precyzji, co pozwala na rezygnację z zewnętrznego kwarcu. Cyfrowy układ PLL dostarcza stabilnego sygnału zegarowego 48 MHz. Technologia BAW została opisana w artykule „Technologia Bulk-Acoustic-Wave (BAW)" [31].

Firma udostępnia zestaw uruchomieniowy CC1352R LaunchPad oraz zestaw czujnikowy (IoT) LPSTK – CC1352R LaunchPad SensorTag z czujnikami MEMS niskiej mocy: czujnik oświetlenia otoczenia OPT3001, czujnik wilgotności względnej i temperatury HDC2080, czujnik magnetyczny DRV5032 z zastosowaniem efektu Halla, trzyosiowy czujnik ruchu (akcelerometr) ADXL362 [51].

Obsługa protokołu LoRa

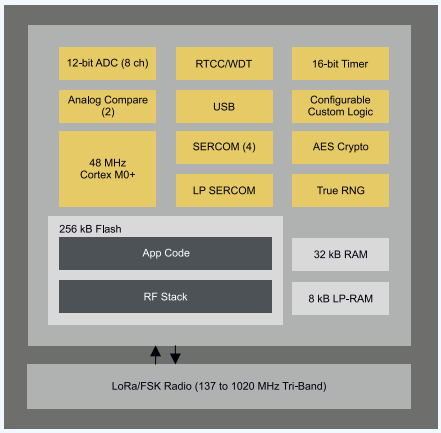
Najczęściej do obsługi sieci LoRaWAN są stosowane układy radiowe firmy Semtech. Zaczynają się pojawiać układy i moduły integrujące układy SoC z tymi modułami radiowymi.

MICROCHIP

Moduły SiP rodziny SAM R34/R35

Moduły SAM R34/R35 firmy Microchip to wysoce zintegrowana rodzina modułów SiP, która obejmuje bardzo energooszczędny 32-bitowy mikrokontroler (MCU) o wysokiej wydajności, transceiver LoRa i stos oprogramowania. Dzięki certyfikowanym projektom referencyjnym i sprawdzonej interoperacyjności z głównymi dostawcami bramek i sieci LoRaWAN, moduły SAM R34/35 SiP znacznie skracają czas wprowadzania na rynek projektów Internetu Rzeczy (IoT). Moduły są dostępne w sześciu wariantach z różnymi opcjami pamięci/interfejsu. SAM R34 dodatkowo zawierają układ komunikacji USB. Moduł ATSAMR34J18 firmy Microchip jest zbudowany z zastosowaniem rdzenia ARM Cortex-M0+ (48 MHz) z pamięcią RAM 32 kB, RAM niskiej mocy 8 kB, Flash 256 kB [19] (**rysunek 21**). Wybrane parametry układu:

- Wydajność 2,46 CoreMark/MHz;
- Modulacja: LoRa i FSK (obsługuje IEEE 802.15.4g i WiSUN);
- Pasmo pracy: 137 MHz do 175 MHz, 410 MHz do 525 MHz, 862 MHz do 1020 MHz;
- Programowana moc wyjściowa w zakresie do +20 dBm;
- Czułość odbiornika do –136 dBm (–148 dBm w trybie fabrycznym);



Rysunek 21. Schemat blokowy modułów rodziny SAMR34 firmy Microchip [19]

- Zasięg >15 km (poza terenem zabudowanym);
- Napięcie zasilania 1,8...3,63 V;
- Maksymalny prąd odbiornika 17 mA; RFO_HF 33 mA (typ.);
- Maksymalny prąd nadajnika 32,5 mA (+13 dBm), 94,5 mA (+17 dBm) (typ.);

eprasa.pl 85168ce91e

- Prąd: w stanie oczekiwania 1,4 µA, uśpienia 790 nA;
- Moduł CRC-32;
- Obudowa BGA64 6×6 mm.

ST MICROELECTRONIC

Seria MCU STM32WL – pierwszy SoC z obsługą LoRa

STM32WL firmy ST Microelectronics jest w pełni otwarty i obsługuje multimodulację, co czyni go idealnym wyborem do rozwiązań LPWAN i IoT z wyjątkowo niskim zużyciem energii bez utraty wydajności. Układ jest zbudowany z zastosowaniem rdzenia ARM Cortex-M4 (48 MHz) z pamięcią RAM 32 kB, RAM niskiej mocy 8 kB, Flash 256 kB [32] (**rysunek 22**). Wybrane parametry układu:

- Wydajność 1,25 DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1), <72 µA/MHz (CoreMark);
- Modulacja: LoRa i (G)FSK, (G)MSK, BPSK;
- Pasmo pracy: 150 MHz do 960 MHz;
- Programowana moc wyjściowa w zakresie do +22 dBm;
- Czułość odbiornika do –123 dBm (2-FSK, 1,2 kbps), –148 dBm (LoRa 10,4 kHz);
- Napięcie zasilania 1,8...3,6 V;
- Maksymalny prąd odbiornika 4,82 mA;
- Maksymalny prąd nadajnika 15 mA (+10 dBm);

Rysunek 22. Schemat blokowy układu firmy ST Microelectronics [32]

- Prąd: w stanie wyłączenia 1 nA, oczekiwania (+RTC) 360 nA, 1,4 µA, uśpienia 790 nA;
- Sprzętowy moduł kryptograficzny AES-256, CRC oraz TRNG;
- Cechy unikalne – do 48 wyprowadzeń I/O, większość z tolerancją 5 V.

Obsługa protokołów LTE-M i NB-IoT

Układy scalone z obsługą mobilnej komunikacji IoT zostały omówione w poprzednim artykule [38]. Wgląd w niektóre układy SoC i SiP też został pokazany wcześniej [S27]. Od tego czasu ten obszar komunikacji bardzo się rozwija, co będzie wymagało osobnego omówienia.

NORDIC SEMICODUCTOR

Moduł SiP nRF9160

Moduł nRF9160 SiP to kompaktowy, wysoce zintegrowany moduł System-in-Package (SiP), który sprawia, że najnowsza technologia LTE o niskim poborze mocy oraz zaawansowane przetwarzanie i zabezpieczenia są dostępne i łatwe w użyciu dla szerokiej gamy urządzeń mobilnego Internetu Rzeczy [33]. Zawiera procesor aplikacyjny ARM Cortex-M33 wyłącznie dla aplikacji, pełny modem LTE, interfejs RF (RFFE) i system zarządzania energią. NRF9160 to najbardziej kompaktowe, kompletne i energooszczędne rozwiązanie IoT na rynku. Zintegrowany modem obsługuje zarówno LTE-M, jak i NB-IoT i może działać globalnie, eliminując potrzebę stosowania wariantów regionalnych. Wszystkie funkcje oszczędzania energii, w tym eDRX i PSM, są obsługiwane, podobnie jak w przypadku obsługi IPv4/IPv6 do poziomu transportu i bezpieczeństwa (TCP/TLS). Oprogramowanie modemu można aktualizować za pomocą bezpiecznych, zaszyfrowanych aktualizacji oprogramowania sprzętowego Over The Air (FOTA).

Bezpieczeństwo jest na najwyższym poziomie w swojej klasie dzięki technologii ARM TrustZone do izolacji i ochrony normalnych

Literatura:
[1] More than Microchips — How the Semiconductor Industry Keeps Evolving, Utpal Bankshi, DEC 27, 2019, ElectronicDesign, https://bit.ly/33XXXVi
[2] Connecting the Future: Three Wireless Trends on the 2020 Horizon, Daniel Cooley, DEC 27, 2019, ElectronicDesign, https://bit.ly/2T0k7Qo
[3] IoT Trends Report 2020, Farnell Global IoT Survey, September–December 2019, Farnell, https://bit.ly/379YkOQ
[4] CC1352R, SimpleLink 32-bit ARM Cortex-M4F multiprotocol Sub 1 GHz & 2.4 GHz wireless MCU with 352kB Flash, Texas Instrumets, https://bit.ly/3dqCYOc
[5] nRF5340, System on Chip, Product Page, Nordic Semiconductor, http://bit.ly/2v3VMAI
[6] AS_NRF51822P, FleX BLE Bluetooth Low Energy with ARM Cortex-M0+, American Semiconductor, http://bit.ly/2VkyEFA
[7] ARM Eases Upfront Licensing Fees to Head Off RISC-V, James Morra, JUL 18, 2019, ElectronicDesign, https://bit.ly/2Fw7Joh
[8] ARM Signs Agreement Giving DARPA Access to Chip Technology, James Morra, AUG 24, 2020, ElectronicDesign, https://bit.ly/33YF7NN
[9] DesignWare ARC EM Processor Family, Synopsys, https://bit.ly/2Fwx1mn
[10] EM9304 optimized Bluetooth 5.0 Low Energy Companion or SoC, EM Microelectronic, https://bit.ly/3j2g9l8
[11] GD32 RISC-V Microcontrollers, GigaDevice Semiconductor, https://bit.ly/3kdyCwc
[12] BLE & Bluetooth, https://bit.ly/3drZeqZ
[13] 32-bit ARM® Cortex®-M4 Cortex-M0+ PSoC® 6, Cypress, https://bit.ly/31b6NgF
[14] CYW20819, Cypress, https://bit.ly/2H8zt2E
[15] SmartBond TINY DA14531, Dialog Semiconductor, https://bit.ly/3k1ejCr
[16] SmartBond DA1469x Product Family, Dialog Semiconductor, https://bit.ly/340mKbl
[17] DWM1001C Module, Decawave, https://bit.ly/3dwmzYk
[18] Darwin Ultra-Low-Power Microcontrollers, Maxim Integrated, https://bit.ly/31c9Jtv
[19] Microchip, https://bit.ly/340mQzJ
[20] Nordic Semiconductor, https://bit.ly/340ELXe
[21] Bluetooth 5.2/Bluetooth LE SiP module designed for OEMs of ultra-compact wearables and medical devices, 09Jul 2020, Nordic Semiconductor, https://bit.ly/2SZ09FX
[22] K32W061/41: High Performance, Secure and Ultra-Low-Power MCU for ZigBee,Thread, and Bluetooth® LE 5.0 with Built-in NFC option, NXP, https://bit.ly/2H4MCtF
[23] KW39/38/37: 32-bit Bluetooth 5.0 Long-Range MCUs with CAN FD and LIN Bus Options, ARM® Cortex®-M0+ Core, NXP, https://bit.ly/33YG3Sj
[24] 88W9098: 2.4/5 GHz Dual-Band 2x2 Wi-Fi 6 (802.11ax) + Bluetooth 5.1, NXP, https://bit.ly/2GSF2CU
[25] RSL10: Radio SoC, Bluetooth® 5 Certified, SDK 3.4, https://bit.ly/3m1yNLZ
[26] QPG6095, ZigBee®/Thread/Bluetooth® Low Energy Smart Home Communications Controller, Qorvo, http://bit.ly/2GfMaon
[27] QCC5141, Qualcomm, https://bit.ly/3150BH9
[28] RX23W, 32-bit microcontrollers with Bluetooth 5 for IoT endpoint devices, system control and wireless communication achieved on a single chip, https://bit.ly/3nSnXcB
[29] EFR32BG22C224F512IM40, Bluetooth Low Energy EFR32BG22 SoCs (Series 2), Laboratories, https://bit.ly/34Z7RWe
[30] STM32WB55VG, ST Microelectronics, https://bit.ly/37a4XAy
[31] Technologia Bulk-Acoustic-Wave (BAW), EP 7/2019
[32] STM32WLE5JC, ST Microelectronics, https://bit.ly/340nFIP
[33] nRF9160 System-in-Package, Low power SiP with integrated LTE-M/NB-IoT modem and GPS, Nordic Semiconductor, http://bit.ly/2WD2N4o
[34] Nordic Thingy:91, Cellular IoT Prototyping platform, Product Page, Nordic Semiconductor, http://bit.ly/2MVC14V
[35] Mikrokontrolery do zadań specjalnych, Piotr Zbysiński, EP 10/2019, https://bit.ly/3j0nwcN
[36] RISC-V – budujemy własny mikrokontroler, Rafał Kozik, EP 9/2019, https://bit.ly/3nT7sgB
[37] FE310 Freedom Everywhere, SiFive, https://bit.ly/340GfRi
[38] Układy scalone z obsługą mobilnej komunikacji IoT, EP 1/2019, https://bit.ly/2SWbh6r
[39] Układ scalony STM32WB55, 3/2019
[40] Dokładna lokalizacja w pomieszczeniach w standardzie Bluetooth v5.1, EP 4/2019, https://bit.ly/3j2NgVI
[41] Układy scalone z obsługą protokołu Thread, EP 5/2019, https://bit.ly/3lSIlc3
[42] Wgląd w układy SoC (System on Chip), moduły SiP (System in Package) oraz elastyczne układy SoP (Silicon-on-Polymer), EP 6/2019, https://bit.ly/3duZB3W
[43] Układy scalone z obsługą Bluetooth 5, Henryk A. Kowalski, EP 5/2018, https://bit.ly/2GSIs8I
[44] Zestaw uruchomieniowy nRF52840 DK, EP 9/2019
[45] Praca z jednoczesną komunikacją radiową BLE 5 oraz IEEE 802.15.4, EP 10/2019
[46] Nordic Thingy:91 – platforma prototypowania dla mobilnego IoT, EP 11/2019
[47] nRF5340 – pierwszy procesor komunikacyjny SOC z dwoma rdzeniami ARM Cortex-M33, EP 2/2020
[48] Wtyczka nRF52840 Dongle, EP 2/2019, https://bit.ly/3k1gPZ3
[49] Zestaw Nordic Thingy:52 IoT Sensor Kit, EP 12/2018, https://bit.ly/2T9KRyl
[50] Pozyskiwanie energii z fal radiowych, EP 10/2020
[51] Zestaw czujnikowy LPSTK - CC1352R LaunchPad SensorTag, EP 1/2020

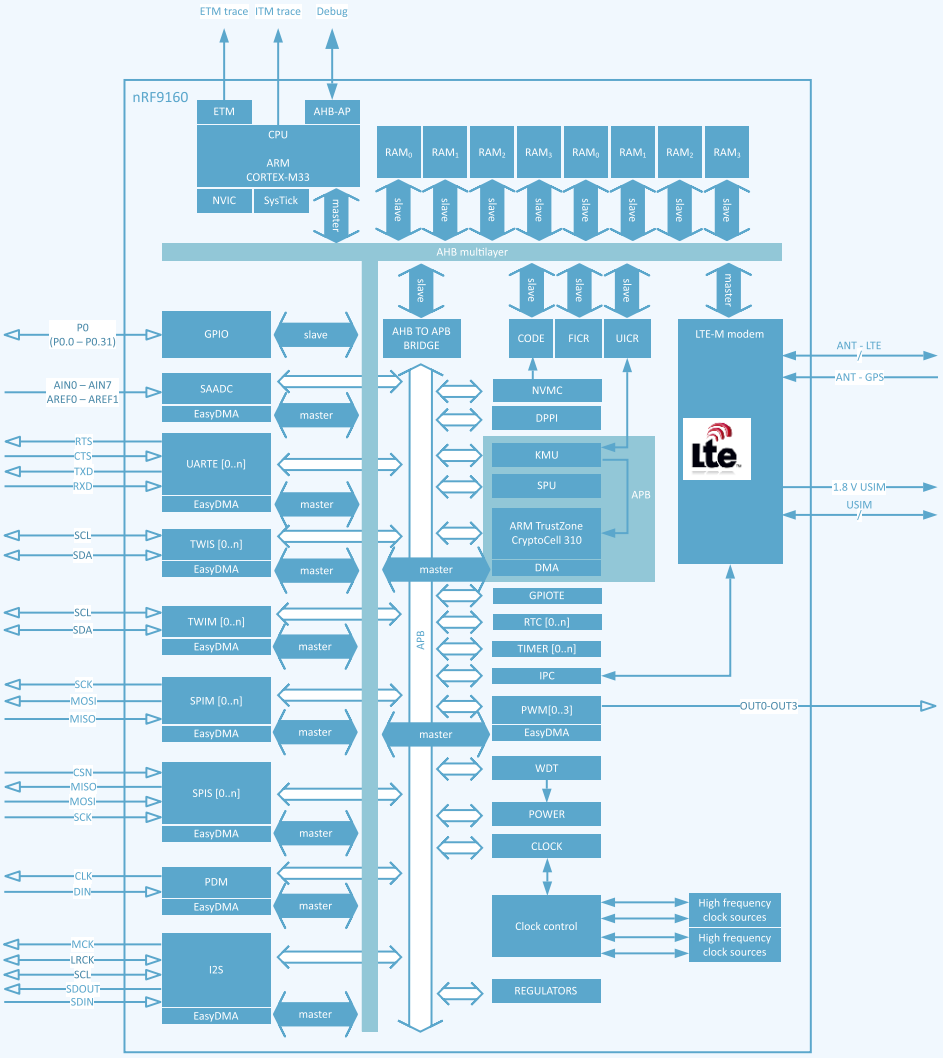
eprasa.pl 85168ce91e

i bezpiecznych stref oprogramowania układowego i elementów sprzętu, w tym pamięci i urządzeń peryferyjnych.

W module zintegrowany jest odbiornik GPS, który oferuje różne tryby pracy, dostosowane do szerokiego wyboru aplikacji wykorzystujących funkcję śledzenia lokalizacji.

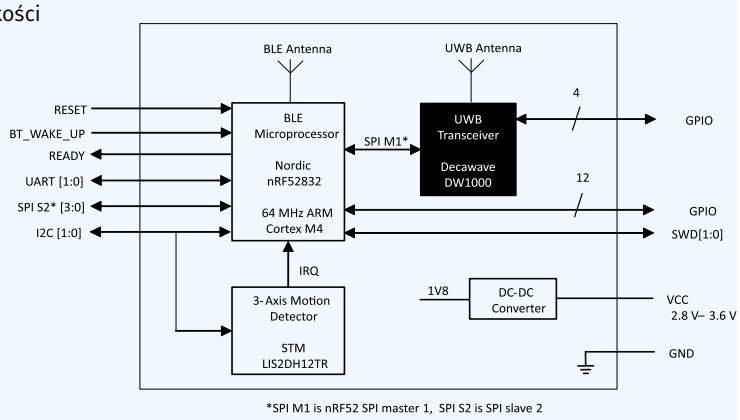
Moduł NRF9160 SiP firmy Nordic Semiconductor jest zbudowany z zastosowaniem rdzenia ARM Cortex-M33 (64 MHz), 1 MB Falsh, 256 kB RAM [33] (**rysunek 23**). Wybrane parametry układu:

- Wydajność rdzenia 243 EEMBC CoreMark (praca z pamięci Flash);
- Pasmo pracy: LTE 700-2200 MHz;
- Protokoły IoT: 3GPP LTE release 13 Cat-M1 and Cat-NB1, 3GPP LTE release 14 Cat-NB2;
- Przepustowość LTE-M: 300/375 kbps, NB-IoT: 30/60 kbps;
- Programowana moc wyjściowa w zakresie do +23 dBm;
- Czułość odbiornika LTE-M: –108 dBm, NB-IoT: –114 dBm;
- Odbiornik GPS: GPS L1 C/A;
- Napięcie zasilania 3,3...5,5 V;
- Pobór mocy (LTE-M, 3,7 V): PSM 3 µA, eDRX 7 µA, PSM (UL 1 KB co 12 godz.) 5,5 µA, DRX (co 2,7 min) 0,75 mA;
- Uśpienie: rdzeń 1,8 µA, modem 2,2 µA;
- Sprzętowy moduł kryptograficzny ARM CryptoCell 310 oraz ARM TrustZone;
- Obsługuje karty SIM i eSIM do łączenia i uwierzytelniania z operatorami sieci komórkowych;
- Obudowa 10×16×1 mm LGA;
- Cechy unikalne:
  - Certyfikat do pracy na całym świecie;
  - Do 48 wyprowadzeń I/O, większość z tolerancją 5 V.



Rysunek 23. Schemat blokowy modułu NRF9160 SiP firmy Nordic Semiconductor [33]

Nordic Semiconductor oferuje zestaw czujnikowy Nordic Thingy:91 [34] zawierający czujniki: temperatury, wilgotności, ciśnienia, jakości powietrza, koloru i poziomu oświetlenia i dwa czujniki ruchu. Zestaw Thingy:91 ma globalną certyfikację do pracy w sieciach komórkowych i jest idealną platformą do prototypowania systemów komunikacji mobilnego IoT z zasilaniem bateryjnym. Bardzo bogate oprogramowanie narzędziowe i aplikacyjne dla komputerów stacjonarnych i urządzeń mobilnych. Umożliwia bardzo łatwe i szybkie prototypowanie [46].



Rysunek 24. Moduł DWM1001C firmy Decawave [17]

Moduły

Dostępnych jest bardzo dużo gotowych modułów z układami komunikacyjnymi dla IoT. Typowo zawierają one układ SoC obudowany elementami dyskretnymi oraz anteną. Ostatnio zaczynają się pojawiać ciekawe moduły z synergiczną pracą układów scalonych dla różnych protokołów.

eprasa.pl 85168ce91e

DECAWAVE (QORVO)

Moduł DWM1001C z obsługą BLE i UWB

Moduł DWM1001C firmy Decawave łączy w sobie moduł DW1000 firmy Decawave, układ SoC nRF52832 Nordic Semiconductor i 3-osiowy akcelerometr (STM LIS2DH12TR) [17] (**rysunek 24**). DWM1000 to bezprzewodowy moduł nadawczo-odbiorczy zgodny ze standardem IEEE802.15.4-2011 UWB. nRF52832 obsługuje Bluetooth LE 5.2, detekcję kierunku oraz Bluetooth Mesh. Każdy moduł można skonfigurować jako sensory (anchor) RTLS lub tag, a dodatkowo może działać jako urządzenie bramy sieciowej. Umożliwia lokalizację obiektów w systemach lokalizacji w czasie rzeczywistym (RTLS) z dokładnością do 10 cm w pomieszczeniach (schematy lokalizacji ToF i TDoA), komunikację z dużą szybkością (do 6,8 Mb/s) i doskonały zasięg komunikacji do 300 m dzięki spójnym technikom odbiornika. Przy napięcie zasilania 2,8 do 3,6 V moduł pobiera bardzo mało mocy: tryb głębokiego uśpienia 4 µA.

Podsumowanie

Przegląd portali producentów układów scalonych przydatnych dla IoT pokazuje często występujący problem z umiejscowieniem tych produktów w palecie wyrobów. Nie można ich znaleźć w kategorii układy bezprzewodowe i radiowe ani mikrokontrolery.

Znaczącym trendem jest rosnące zapotrzebowanie na bardziej zintegrowaną ofertę. Pięć lat temu (i wcześniej) producenci prawie całkowicie koncentrowali się na budowie układów scalonych jako elementów większych systemów. Dzisiaj firmy technologiczne oczekują, że producenci chipów zapewnią nie tylko podstawowe rozwiązanie sprzętowe, ale także w pełni zintegrowane systemy oprogramowania i funkcje analizy biznesowej towarzyszące temu sprzętowi.

Kluczowym czynnikiem umożliwiającym IoT, inteligentne miasta i przetwarzanie krawędziowe będzie dostępność gotowych do wdrożenia płyt i rozwiązań. Dla rozwoju Internetu Rzeczy bardzo ważna jest dostępność kompletnych modułów IoT z komunikacją radiową.

W lipcu 2020 Analog Devices ogłosił połączenie z Maxim Integrated. Właśnie (14.09.2020) Nvidia zapowiedziała, że w ciągu 18 miesięcy kupi brytyjską firmę ARM od japońskiego konglomeratu technologicznego SoftBank. Jeśli transakcja zostanie zamknięta, to przekształci Nvidię w jednego z najbardziej dominujących graczy na rynku chipów używanych w smartfonach. Umowa umocniłaby także pozycję firmy z Santa Clara w Kalifornii w innych obszarach przemysłu technologicznego, w tym w Internecie Rzeczy. Wygląda na to, że czekają nas duże zmiany na rynku procesorów dla IoT.

Henryk A. Kowalski
Instytut Informatyki
Politechnika Warszawska

REKLAMA

Nowe zestawy do IOT od firmy Kradex

odpowiedzią na zapotrzebowania rynku elektronicznego

Platformy takie jak Arduino czy Raspberry Pi nie stanowią już tylko podstawy prac amatorów, czy miłośników uczących się elektroniki. Środowiska te rozwinęły się i są doskonałą bazą do choćby prototypowania, po którą coraz częściej sięgają zawodowcy. Ten rozwój był możliwy między innymi dzięki różnorodnym obudowom, produkowanym specjalnie do takich zastosowań.

Jako producent obudów do elektroniki firma Kradex śledzi zapotrzebowanie rynku i w odpowiedzi na nie przygotowała specjalny zestaw IOT.ZPSET1510. Zestaw zawiera obudowę hermetyczną wraz z akcesoriami i został zaprojektowany z myślą o szybkim i wygodnym prototypowaniu układów IOT, płytek SBC, dowolnych czujników lub układów wykonawczych. Wykonane na jego bazie układy można łatwo serwisować i modyfikować dzięki demontowalnej płycie montażowej, którą można wymienić bez konieczności demontażu obudowy.

Głównym elementem zestawu jest obudowa hermetyczna ZP150.100.60SU o wymiarach 150×100×60 mm, z uchem montażowym i uszczelką wylewaną, wykonana z poliwęglanu. Zapewnia ona dobrą szczelność oraz ochronę mechaniczną. Zawarte w zestawie dławiki kablowe wraz z wyfrezowanymi w obudowie otworami do ich instalacji oraz zestaw akcesoriów zmniejszają ilość czynności koniecznych do wykonania przez użytkownika i przyspieszają proces montażu i instalacji gotowego urządzenia.

Zestaw dostępny jest w dwóch wariantach: z wieczkiem transparentnym (**fotografia 1**) oraz szarym (**fotografia 2**). W trakcie prac przygotowawczych był testowany przez praktyków i miłośników elektroniki, dzięki czemu produkt końcowy uwzględnia uwagi testerów i odpowiada na faktyczne potrzeby użytkowników. Przeznaczony jest między innymi do prac z takimi kontrolerami jak: Odroid, Arduino czy Raspberry Pi. Wszystkie te kontrolery przechodziły testy, a ich wyniki są dostępne w Instrukcji dla instalatora: https://bit.ly/3o6isHH. W pudełku wraz z elementami kompletu znajdują się również szablony otworów do montażu IOT.ZPSET1510 na ścianie oraz słupków do przycinania PCB do IOT.ZPSET1510, aby jeszcze bardziej ułatwić korzystanie z produktu.

Zaprezentowany zestaw jest pierwszym z serii IOT, w przygotowaniu jest już kolejna jego wersja, tym razem z większą obudową.

Zapraszamy na naszą stronę: www.kradex.com.pl.

Więcej informacji:
KRADEX
04-205 Warszawa, ul. Naddnieprzańska 32
tel. +48 22 613 08 88, kradex@kradex.com.pl
www.kradex.com.pl

Fotografia 1. Obudowa z wieczkiem transparentnym

Fotografia 2. Obudowa z wieczkiem szarym

eprasa.pl 85168ce91e

Moduły HighFlying w ofercie firmy Micros

Micros jest autoryzowanym dystrybutorem produktów HighFlying. Są to przede wszystkim specjalizowane moduły komunikacyjne przeznaczone do zastosowań w wielu gałęziach Internetu Rzeczy.

Więcej informacji:
Micros Sp.j. W. Kędra i J. Lic
30-198 Kraków, ul. E. Godlewskiego 38
tel. +48 12 636 95 66 wew. 107
faks +48 12 636 93 99
bok@micros.com.pl, www.micros.com.pl

Moduły Wi-Fi serii Low Power

HighFlying specjalizuje się w produkcji modułów komunikacyjnych. Bogata oferta produktów tego producenta dostępna jest w ofercie firmy Micros, szczególnie interesujące są miniaturowe moduły serii **HF-LPx30**. Są to samodzielne interfejsy Wi-Fi na pasmo 2,4 GHz, wspierające standardy 802.11 b/g/n, zoptymalizowane pod kątem niskiego zużycia energii. Do tej rodziny zaliczają się moduły: HF-LPB130, HF-LPT130A, HF-LPT130B, HF-LPB135, HF-LPT230 oraz HF-LPT330. Małe wymiary i niewielki pobór prądu powodują, że moduły doskonale nadają się do zastosowania w urządzeniach automatyki domowej, czujnikach i monitorach parametrów oraz urządzeniach przenośnych i medycznych.

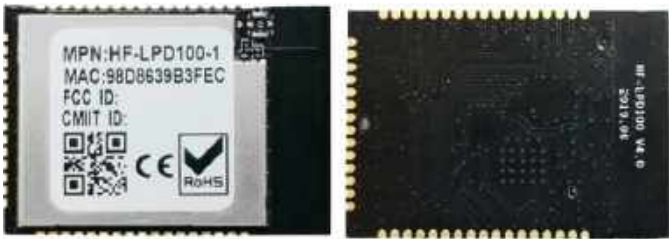
Wszystkie wersje modułów pokazuje **rysunek 1**. Różnią się liczbą wyprowadzeń, sposobem montażu, wymiarami oraz typem anteny (antena zintegrowana na płytce modułu i/lub złącze IPEX dla zewnętrznej anteny). Podstawowym interfejsem sterującym jest UART i jest dostępny na wyprowadzeniach każdego z modułów, opcjonalne dodatkowe wyprowadzenia to porty GPIO dzielone z interfejsem SPI oraz jedno wejście połączone z przetwornikiem ADC. Moduł HF-LPB130 ma także interfejs USB. Dokładna specyfikacja modułów dostępna jest na stronie producenta https://bit.ly/3e5W3Wd.

Moduły serii HF-LPX30 można skonfigurować zarówno jako bezprzewodowy STA (skrót od *Station*, czyli terminal, który łączy się z siecią bezprzewodową), jak i punkt dostępowy AP (czyli bezprzewodowy *Access Point*, twórca sieci bezprzewodowej. Router bezprzewodowy, którego używamy w domu lub w biurze, może być punktem dostępowym).

Port szeregowy UART do przesyłania danych jest realizowany w tzw. przezroczystym trybie transmisji (*Transparent Transmission Mode*). Zaletą tego trybu jest osiągnięcie szeregowego portu danych typu *plug and play* i maksymalne ograniczenie zaangażowania użytkownika. Wystarczy tylko jednorazowa konfiguracja niezbędnych parametrów, potem moduł może automatycznie łączyć się z domyślną siecią bezprzewodową lub serwerem. Tryb przezroczystej transmisji pozwala myśleć o łączu bezprzewodowym jak o wirtualnym kablu szeregowym i wysyłać i odbierać dane jak poprzez zwykły port szeregowy. Urządzenia komunikujące się przewodowym interfejsem szeregowym mogą być połączone bezpośrednio z modułem, bez żadnych

Rysunek 1. Moduły Wi-Fi serii HF-LPx30

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 2. Dwuzakresowy moduł typu HF-LPD100

modyfikacji i mogą być w pełni zgodne z oryginalnym oprogramowaniem. Ponadto moduły zapewniają szyfrowaną komunikację, dzięki czemu komunikacja i przesyłane dane są bezpieczne. Obsługiwane są wszystkie obecnie stosowane standardy: WEP, WPA i WPA2. Konfigurowanie modułu może być wykonane poprzez komendy AT lub wbudowany interfejs graficzny działający jak strona www.

Dwuzakresowy moduł Wi-Fi

Moduł **HF-LPD100** jest samodzielnym modułem Wi-Fi obsługującym dwa pasma radiowe: 2,4 i 5 GHz, wspierającym standardy 802.11 a/b/g/n (**rysunek 2**). Niewielki moduł integruje blok radiowy ze wzmacniaczem mocy oraz procesor sterujący obsługujący stos sieciowy i oprogramowanie sterujące. Tak jak poprzednie moduły bazuje na architekturze o bardzo niskim zużyciu energii. Został zoptymalizowany do zastosowań we wszelkiego rodzaju aplikacjach klienckich, w automatyce domowej, inteligentnych sieciach, urządzeniach przenośnych, osobistych aplikacjach medycznych, sterowaniu przemysłowym oraz innych systemach, które wymagają mniejszych szybkości transmisji i rzadko przesyłają lub odbierają dane. Podstawowe cechy i parametry modułu to:

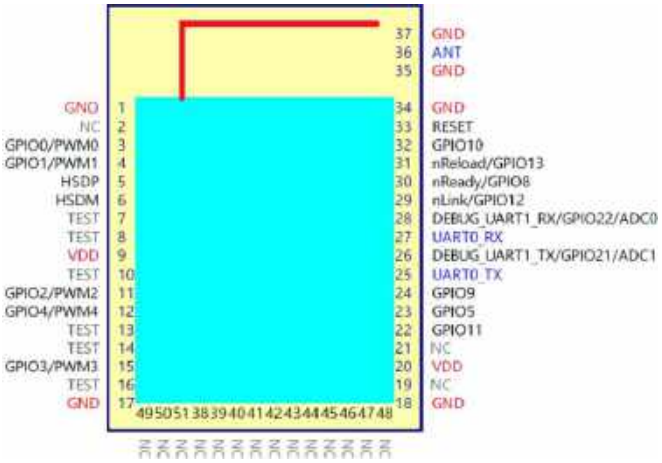
- Obsługa sieci Wi-Fi standardu IEEE802.11 a/b/g/n, w paśmie 2,4 oraz 5 GHz;
- Procesor sterujący taktowany zegarem 160 MHz, wyposażony w 192 kB pamięci RAM oraz 2 MB pamięci Flash;
- Sterowanie i komunikacja poprzez interfejs UART;
- Może pracować w trybie STA lub AP albo AP+STA;
- Ma łatwe w obsłudze oprogramowanie do konfiguracji;
- Pozwala na aktualizację oprogramowania poprzez bezprzewodową sieć (OTA);
- Przygotowany SDK dla programistów;
- Antena zintegrowana na płytce modułu;
- Zasilanie napięciem 3,3 V;
- Wymiary modułu HF-LPD100 to: 23,1×32,8×3,5 mm, obudowa typu SMT48;
- Posiada certyfikaty FCC/CE/SRRC/RoHS,
- Pracuje w zakresie temperatury od –20 do +85°C.

Na **rysunku 3** zostały pokazane układ i funkcje wyprowadzeń modułu. Został wyposażony w dwa porty UART, kilka portów GPIO z możliwością pracy w trybie PWM oraz interfejs USB.

Moduły sieciowe Ethernet z interfejsem UART

Zaprezentowane tu modele – Eport-E20 i Eport PRO-EP20, służą do dwukierunkowej transmisji danych pomiędzy portem UART a portem Ethernet. Oba moduły sprawdzą się w aplikacjach z takich dziedzin, jak: telemetria i zarządzanie zasobami, czujniki przemysłowe, urządzenia medyczne, modemy, sprzęt telekomunikacyjny i wiele innych.

Konwerter **Eport-E20** (**rysunek 4**) dysponuje procesorem z rdzeniem ARM Cortex-M3, taktowanym zegarem 96 MHz oraz wbudowaną pamięcią Flash o pojemności 2 MB i pamięcią SDRAM o pojemności 128 kB. Zarządzany jest przez system operacyjny FreeRTOS. Komunikacja z siecią odbywa się przez interfejs Ethernet 10/100M. Moduł obsługuje protokoły TCP/IP, Telnet, Modbus, protokoły bezpieczeństwa TLS, AES, DES3 oraz wiele innych. Maksymalna szybkość portu szeregowego wynosi 921600 bps. Moduł daje możliwość prostej konfiguracji przez stronę www oraz aktualizację OTA. Napięcie zasilania



Rysunek 3. Układ i funkcje wyprowadzeń modułu typu HF-LPD100

wynosi 3,3 V, a wymiary zewnętrzne to 50×23×11 mm. Moduł ma certyfikaty FCC, CE oraz RoHS.

Konwerter **Eport PRO-EP20** (**rysunek 5**) dysponuje procesorem o architekturze MIPS taktowanym zegarem 320 MHz. Ma wbudowaną pamięć Flash o pojemności 16 MB oraz pamięć SDRAM o pojemności 32 MB. Zarządzany jest przez system operacyjny Linux. Podobnie jak w wersji podstawowej, komunikacja z siecią przebiega przez interfejs Ethernet 10/100M. Moduł obsługuje protokoły TCP/IP, Telnet, Modbus, protokoły bezpieczeństwa SSL, AES, DES3 oraz wiele innych. Maksymalna szybkość portu szeregowego wynosi 460800 bps. Moduł daje możliwość prostej konfiguracji przez stronę www oraz aktualizację OTA. Napięcie zasilania wynosi 3,3 V, a wymiary – 50×23×11 mm. Moduł ma certyfikaty FCC, CE oraz RoHS.

Wi-Fi i BLE5.0

Wkrótce do oferty zostanie wprowadzony nowy moduł typu **HF-LPT270** (**rysunek 6**). Umożliwia on realizację komunikacji w standardzie Wi-Fi oraz BLE5.0, a sterowanie i wymiana danych odbywają się poprzez interfejs UART. Najważniejsze cechy i parametry modułu to:

- Wsparcie dla standardów komunikacji bezprzewodowej Wi-Fi IEEE802.11 b/g/n oraz BLE5.0;
- Bazuje na procesorze RISC SoC, taktowanym z częstotliwością 160 MHz, wyposażonym w 276 kB pamięci RAM i 2 MB pamięci Flash;

Rysunek 4. Konwerter Eport-E20

Rysunek 5. Konwerter Eport PRO-EP20

eprasa.pl 85168ce91e

Rysunek 6. Moduł typu HF-LPT270

- Sterowanie i wymiana danych odbywają się poprzez interfejs UART;
- Obsługa trybów Wi-Fi: STA/AP;
- Obsługa BLE SmartBLELink Config;
- Obsługa Wi-Fi AP SmartAPLink i Sniffer SmartLink Config;
- Obsługa bezprzewodowej i zdalnej aktualizacji oprogramowania sprzętowego (OTA);
- Dostępny pakiet oprogramowania SDK (*Software Development Kit*);
- Obsługa wewnętrznej anteny na płytce drukowanej lub opcjonalnie zewnętrznej anteny poprzez złacze IPEX;
- Zasilanie napięciem 3,3 V;
- Wymiary: 22,5×13,5×3 mm.

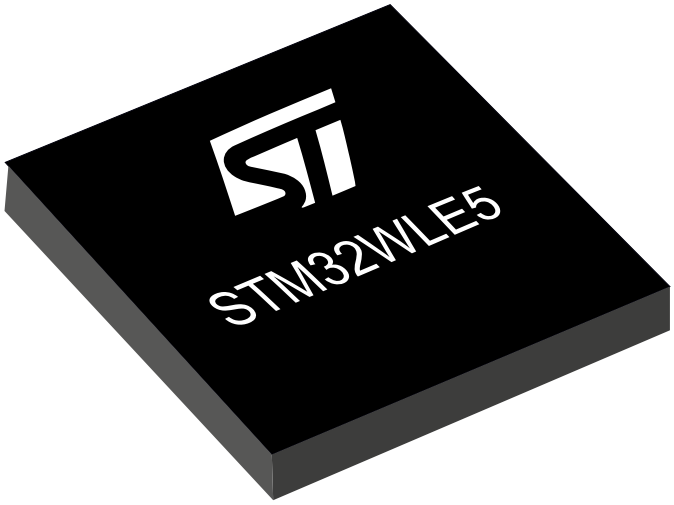
Na uwagę zasługuje łatwy sposób konfigurowania modułu. Użytkownik łączy się poprzez bezprzewodowy interfejs Wi-Fi z modułem działającym jak access point. Podając domyślne ustawienia, w tym przypadku SSID: HF-LPT270, a następnie łącząc się z adresem http://10.10.100.254 i podając domyślną nazwę użytkownika i hasło (admin, admin), otwieramy rozbudowane menu konfiguracyjne w postaci strony internetowej (**rysunek 7**). Nowe ustawienia są zapisywane w pamięci nieulotnej i wczytywane przy każdym kolejnym uruchomieniu modułu. W analogiczny sposób wykonywana jest aktualizacja oprogramowania firmware oraz programowanie wewnętrznej strony internetowej (*customized webpage*).

Rysunek 7. Wygląd interfejsu do konfiguracji modułu

Komunikacja przez interfejs UART odbywa się poprzez zestaw komend AT, które są dokładnie opisane w dokumentacji dostępnej na stronie producenta https://bit.ly/2TxOb6e.

REKLAMA

STM32WL
World's first LoRa SoC



LoRa

(G)FSK (G)MSK

BPSK$_{TX}$

STM32WL, czyli mikrokontroler + sub-GHz RF + LoRa w jednej obudowie

Prezentujemy najważniejsze informacje na temat nowych układów STM32WL, a zwłaszcza cechy które czynią je unikalnymi na rynku.

Od rodziny F1 do rodziny WL

STM32WL to najnowsza propozycja firmy STMicroelectronics z niezwykle popularnej grupy mikrokontrolerów STM32. Historia tych układów to okres trwający już ponad 10 lat. Jej początek sięga roku 2008, kiedy to firma ARM opracowała pierwszy rdzeń z rodziny Cortex-M, a więc Cortex-M3. Firma STMicroelectronics, widząc duży potencjał tego rozwiązania, szybko przystąpiła do projektowania opartych na nim mikrokontrolerów. Na bazie tego rdzenia powstały trzy rodziny układów: STM32F1, STM32L1 i STM32F2. Każda z tych rodzin stała się początkiem osobnej kategorii produktów: mikrokontrolerów ogólnego przeznaczenia, mikrokontrolerów o niskim poborze prądu oraz mikrokontrolerów wysokiej wydajności obliczeniowej.

W następnych latach firma ARM wprowadzała kolejne rdzenie i za każdym razem powstawała co najmniej jedna rodzina STM32, rozszerzając wcześniej zdefiniowane trzy kategorie: STM32F0 (z Cortex-M0), STM32L0 i STM32G0 (obie z Cortex-M0+), STM32F4, STM32F3, STM32L4, STM32G4 (wszystkie z Cortex-M4), STM32F7 i STM32H7 (obie z Cortex-M7) oraz STM32L5 (z Cortex-M33).

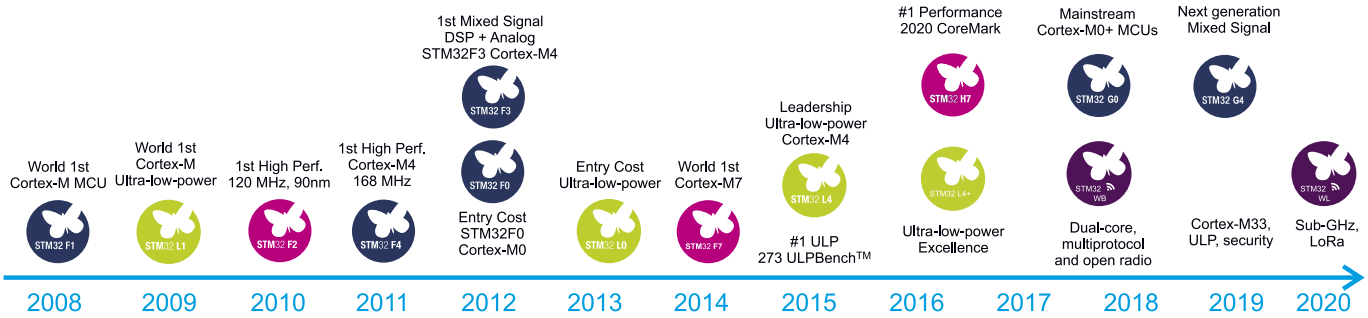
Tak kształtowała się oferta mikrokontrolerów STM32 do roku 2018, kiedy to nastąpiła znaczna zmiana poprzez wprowadzenie zupełnie nowej, czwartej kategorii: układów SoC, które łączą mikrokontroler z nadajnikiem-odbiornikiem radiowym. W roku 2018 powstało pierwsze takie rozwiązanie – rodzina STM32WB (Cortex-M4 i Cortex-M0+) pozwalająca na komunikację w paśmie 2,4 GHz, sprofilowana głównie pod aplikacje wykorzystujące komunikację Bluetooth. Na początku roku 2020 do oferty trafiło drugie rozwiązanie tego typu – tytułowa rodzina STM32WL (Cortex-M4) umożliwiająca komunikację w tak zwanym paśmie sub-GHz, a cechą wyróżniającą to rozwiązanie jest modulacja LoRa. Na **rysunku 1** pokazano zestawienie wszystkich rodzin STM32 z podziałem na kategorie (różne kolory) i z informacją o roku powstania, od rodziny STM32F1 z 2008 r. do STM32WL z 2020 r.

LoRa w świecie komunikacji radiowej

Komunikacja bezprzewodowa to technologia, która rozwija się bardzo dynamicznie na przestrzeni wielu lat. Wskutek tego rozwoju opracowanych i wdrożonych zostało wiele rozwiązań. Najpopularniejsze z istniejących obecnie standardów zebrano na zestawieniu widocznym na **rysunku 2**, gdzie pogrupowano je w cztery kategorie. Różnią się one pod względem przepływności danych i odległości komunikacji. LoRa należy do kategorii LPWAN (*Low-Power Wide-Area Network*). Rozwiązania z tej grupy charakteryzują się małą przepływnością danych i dużą odległością komunikacji, a dodatkową cechą jest niski pobór energii.

LoRa to skrót od słów *Long Range*. Rozwiązanie to zostało stworzone przez francuską firmę Cycleo, która następnie została wchłonięta przez firmę Semtech, obecnego właściciela tej technologii oraz

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 1. Grafika z osią czasu pokazującą, w którym roku powstały rodziny STM32 (kolor niebieski – ogólnego przeznaczenia, kolor zielony – o niskim poborze prądu, kolor różowy – o wysokiej wydajności, kolor fioletowy – SoC radiowy)

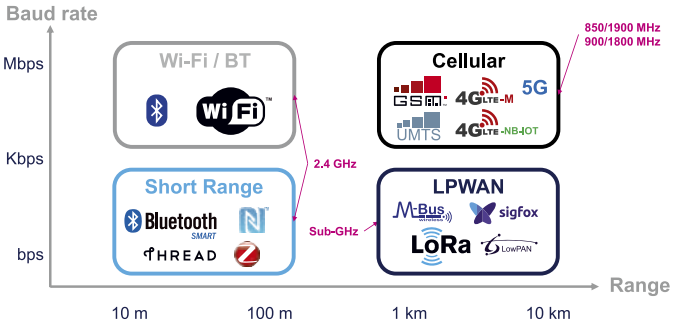
producenta układów wyposażonych w nią. Pod hasłem LoRa kryje się rodzaj modulacji typu CSS (*Chirp Spread Spectrum*), używanej w paśmie poniżej 1 GHz. Wspomniana już odległość transmisji jest kluczowym atutem tej modulacji, ponieważ umożliwia ona w dogodnych warunkach skomunikowanie dwóch punktów odległych od siebie nawet o kilkanaście kilometrów. LoRa to rozwiązanie mieszczące się w najniższej (pierwszej, fizycznej) warstwie modelu OSI. Dzięki temu wyższe warstwy mogą być definiowane pod kątem konkretnych zastosowań. Możliwość zdefiniowania tych warstw tworzy przestrzeń do kreowania standardów rynkowych. Najbardziej znanym standardem zdefiniowanym dla modulacji LoRa jest LoRaWAN, czyli protokół komunikacyjny wykorzystujący warstwę MAC (drugą) modelu OSI. Topologią sieciową w LoRaWAN jest gwiazda, w której przewidziano dwa typy urządzeń: bramkę (*gateway*) oraz węzeł (*end node*). Węzeł ma z kolei trzy kategorie, zwane klasami: A, B oraz C. Różnią się one między sobą profilem w kontekście częstości i długości okresów nadawania i odbierania w paśmie radiowym.

Prezentację technologii warto zakończyć kilkoma przykładami zastosowania. Są to różnego rodzaju aplikacje, gdzie występuje potrzeba wysłania na dużą odległość niewielkiej ilości danych, raz na jakiś czas. Jednym z najlepszych przykładów aplikacji są wodomierze, gazomierze i inne liczniki mediów, które wykorzystują komunikację radiową do przesyłania danych do koncentratorów (zdalny odczyt). Innym dobrym przykładem aplikacji są różnego rodzaju czujniki z bezprzewodową transmisją danych: czujniki przemysłowe (np. poziomu cieczy w zbiornikach), czujniki w systemach inteligentnego budynku (np. temperatury/wilgotności), czujniki zajętości miejsc na parkingach, czujniki monitorujące stan zdrowia zwierząt hodowlanych, czujniki w obszarze rolnictwa (wilgotności gleby, nasłonecznienia).

Od zera do lidera rozwiązań LoRa

Firma Semtech sprawiła, że LoRa zyskała uznanie i rozpoznawalność na skalę światową. Technologia z rozwiązania niszowego stała się jednym ze standardów LPWAN, a układy Semtech znalazły zastosowanie w licznych aplikacjach. Atuty technologii LoRa i jej rosnąca popularność stały się argumentami, które zaważyły na decyzji STMicroelectronics o zainwestowanie w to rozwiązanie. Na przestrzeni kilku ostatnich lat firma podjęła szereg kroków w tym zakresie, dzięki czemu zamiast podążać za trendami związanymi z LoRa, sama je wyznacza. Przyjrzyjmy się najważniejszym osiągnięciom.

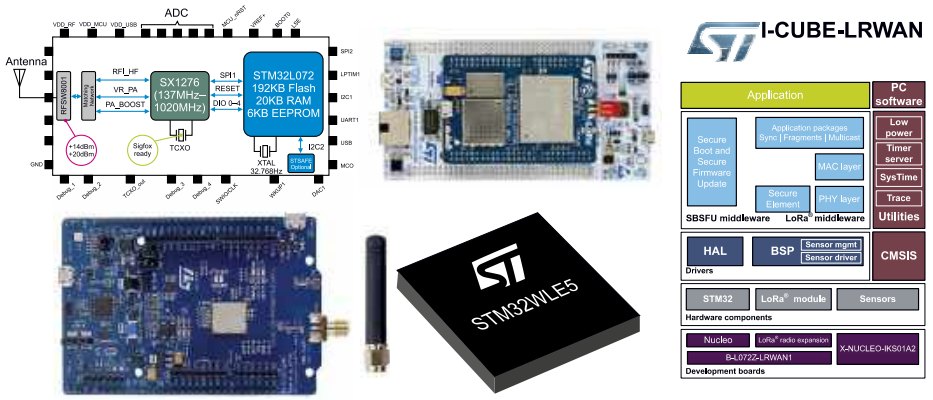
Firma STMicroelectronics nawiązała współpracę z firmą Murata w celu zaprojektowania modułu komunikacyjnego dla LoRa. Moduł ten (CMWX1ZZABZ) wykorzystuje mikrokontroler z rodziny STM32L0 oraz nadajnik-odbiornik radiowy firmy Semtech. Układy te wraz



Rysunek 2. Umiejscowienie technologii LoRa w konstelacji rozwiązań komunikacji bezprzewodowej

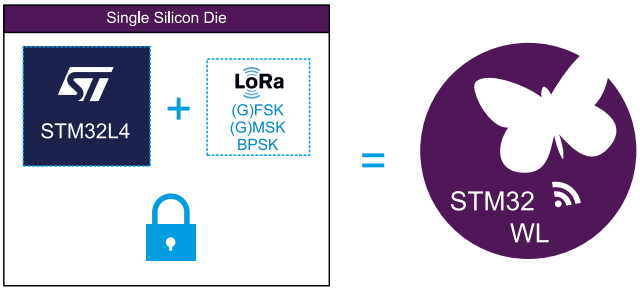
z elementami toru radiowego umieszczone są na płytce PCB o małych wymiarach. Co istotne, moduł jest otwarty, co należy rozumieć jako możliwość nie tylko sterowania modułem poprzez komendy, ale też możliwość pisania aplikacji na mikrokontroler znajdujący się w module. W celu umożliwienia łatwego rozpoczęcia pracy z modułem Muraty, firma STMicroelectronics stworzyła platformę sprzętową – płytkę B-L072Z-LRWAN1. Składa się ona z modułu, złączy sygnałowych z wyprowadzonymi pinami modułu, programatora/debuggera ST-Link i gniazda antenowego (**rysunek 3**).

Kluczowym elementem systemu narzędzi dla LoRa jest stos protokołu LoRaWAN. Takie rozwiązanie jest oferowane przez firmę STMicroelectronics. Pakiet oprogramowania nosi nazwę I-CUBE-LRWAN. Warto podkreślić dwie cechy świadczące o elastyczności i uniwersalności tego rozwiązania. Po pierwsze, stos dostępny jest w formie kodu źródłowego, a nie skompilowanego pliku binarnego, dzięki czemu programista ma wgląd w implementację i jeśli jest taka potrzeba, może dokonać debugowania i edycji kodu. Po drugie, stos jest kompatybilny z różnymi seriami mikrokontrolerów STM32 i układów radiowych Semtech, zatem niezależnie od wybranej pary STM32+ Semtech (bądź też modułu Muraty, który przecież też jest



Rysunek 3. Rozwiązania LoRa i LoraWAN stworzone przez lub z udziałem firmy STMicroelectronics (moduł CMWX1ZZABZ, płytka B-L072Z-LRWAN1, gateway P-NUCLEO-LRWAN2, rodzina STM32WL, pakiet I-CUBE-LRWAN)

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 4. Uproszczony schemat budowy STM32WL

takim połączeniem), stos LoRaWAN z pakietu I-CUBE-LRWAN zawsze będzie możliwy do użycia.

W przypadku użycia stosu LoRaWAN węzeł LoRa komunikuje się z gatewayem. Podczas prac rozwojowych nie zawsze istnieje możliwość użycia urządzenia komercyjnego, gdyż mimo różnych poziomów cenowych zależności od funkcjonalności, koszt takiego rozwiązania ciągle jest znaczący. Stąd pomysł firmy STMicroelectronics na realizację prostego i taniego getewaya z myślą o pracach rozwojowych. Powstały dwa takie urządzenia oparte na płytce Nucleo z mikrokontrolerem STM32 oraz płytce rozszerzeniowej z częścią radiową: gateway P-NUCLEO-LRWAN2 pracujący w paśmie 868/915/923 MHz oraz gateway P-NUCLEO-LRWAN3 pracujący w paśmie 433/470 MHz.

Chcąc mieć istotny wpływ na rozwój technologii LoRa, firma STMicroelectronics przystąpiła do organizacji LoRa Alliance. Ciało to zrzesza firmy z różnych branż: półprzewodnikowej, telekomunikacyjnej, producentów urządzeń itp. W LoRa Alliance członków łączy wspólny mianownik w postaci protokołu LoRaWAN. Organizacja ta odpowiada za prace nad LoRaWAN i za promowanie tego rozwiązania jako jednego ze standardów LPWAN. STMicroelectronics odgrywa ważną rolę w LoRa Alliance, będąc jednym ze sponsorów tej organizacji i pełniąc funkcję członka rady nadzorczej.

W końcu nadszedł moment na najbardziej spektakularną z decyzji, i w konsekwencji osiągnięcie, w tym zestawieniu. Firma STMicroelectronics stworzyła rodzinę układów STM32WL, łączącą cechy mikrokontrolerów STM32 i cechy układów radiowych LoRa firmy Semtech.

Pierwszy LoRa SoC na rynku

W roku 2015 firma STMicroelectronics nawiązała współpracę z firmą Semtech. W ramach podpisanego porozumienia podjęto się realizacji wspólnego planu. W ramach pierwszego etapu tego planu firmy połączyły siły w promowaniu dwuukładowego rozwiązania, bazującego na istniejących konstrukcjach: mikrokontroler STM32+ nadajnik-odbiornik radiowy LoRa SX12xx. Wokół tej pary utworzono system narzędzi, a więc wspomniane wcześniej: stos LoRaWAN, moduły, zestaw ewaluacyjny itp. W ramach drugiego etapu planu przewidziano stworzenie jednoukładowego rozwiązania, które łączyłoby mikrokontroler STM32 i układ radiowy Semtech. Efektem tych prac jest właśnie STM32WL.

Z technicznego punktu widzenia istnieją dwie możliwości budowy jednoukładowego rozwiązania łączącego mikrokontroler i radio: rozwiązanie typu SiP oraz rozwiązanie typu SoC. W układzie SiP (*System in Package*) występują dwie krzemowe struktury półprzewodnikowe. Jedna to mikrokontroler, druga to radio. Obie struktury wykonane są w różnych procesach technologicznych, a ich połączenie zrealizowane jest za pomocą linii sygnałowych wewnątrz obudowy. W przeciwieństwie do układu SiP, w układzie SoC (*System on Chip*) znajduje się jedna krzemowa struktura półprzewodnikowa, która łączy mikrokontroler i radio. STM32WL to układ typu SoC. Zastosowany proces technologiczny to 90 nm. Należy podkreślić, że o ile istnieje na rynku szereg rozwiązań dwuukładowych dla LoRa (mikrokontroler ST lub inny + radio Semtech) oraz o ile istnieje też kilka rozwiązań jednoukładowych SiP dla LoRa, o tyle STM32WL jest pierwszym i jedynym obecnie dostępnym jednoukładowym rozwiązaniem SoC dla LoRa.

Rozwiązanie to ma szereg zalet względem dwóch pozostałych: dużo atrakcyjniejsza cena, niższy pobór prądu, większe możliwości miniaturyzacji, mniejszy BOM (*Bill of Material*) i w konsekwencji prostszy projekt PCB. Funkcjonalnie STM32WL to połączenie dwóch układów: mikrokontrolera low-power z rodziny STM32L4 oraz nadajnika-odbiornika radiowego SX1261/2 (**rysunek 4**).

Elementy składowe STM32WL

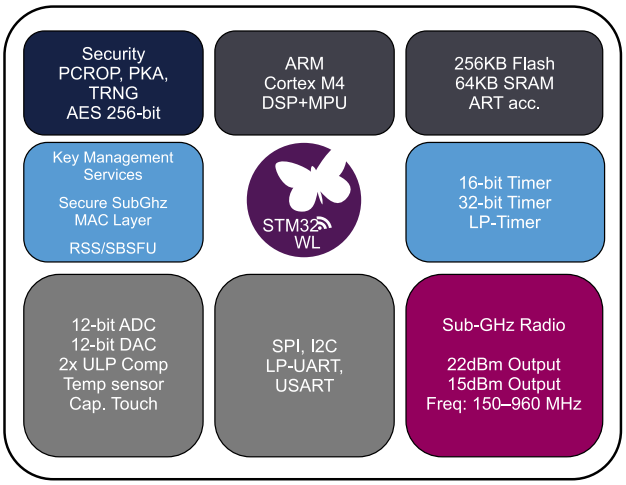
W układach STM32WL można wyróżnić kilka bloków funkcjonalnych: procesor, pamięć, część radiową, liczniki, interfejsy komunikacyjne, zasoby analogowe oraz peryferia zwiększające bezpieczeństwo aplikacji. Schemat blokowy ilustrujący elementy składowe STM32WL pokazano na **rysunku 5**.

Zastosowany w STM32WL procesor ma rdzeń ARM z grupy Cortex-M. Nie mogło być inaczej, ponieważ jednostki Cortex-M są znakiem rozpoznawczym rodziny układów STM32 i ich głównym elementem wspólnym. W przypadku STM32WL zastosowano jednostkę Cortex-M4, która pod kątem wydajności plasuje się pomiędzy prostymi rdzeniami Cortex-M0/M0+ a rdzeniem Cortex-M7 o znacznej wydajności obliczeniowej. Cortex-M4 składa się z jednostki przetwarzania danych (CPU), interfejsu do programowania/debugowania JTAG i SWD, bloku przerwań NVIC, modułu MPU oraz licznika systemowego Systick. Maksymalna częstotliwość pracy rdzenia w STM32WL to 48 MHz.

Do dyspozycji jest do 256 kB pamięci Flash oraz do 64 kB pamięci SRAM. Tak znaczna pojemność pamięci daje nie tylko komfort pracy, ale też możliwość definiowania bogatej funkcjonalności aplikacji. W tym kontekście dla STM32WL można z jednej strony przewidzieć liczne zadania typowe dla mikrokontrolera (w tym np. obsługę interfejsów komunikacyjnych czy też akwizycję sygnałów analogowych), a z drugiej strony można z powodzeniem wkomponować zadania związane z komunikacją radiową, która może wykorzystywać protokół komunikacyjny znacznych rozmiarów. Wspomniane zasoby pamięci to wartości maksymalne, co znaczy, że dostępne są również warianty STM32WL z mniejszą pamięcią, przewidziane do prostych aplikacji.

Wydajność układu STM32WL zwiększa jednostka ART Accelerator, która działając jak pamięć cache, redukuje liczbę tak zwanych cykli *wait states* dla pamięci Flash. Innym elementem architektury związanym z pamięcią jest moduł DMA. Element ten może zostać wykorzystany do transferu danych z peryferiów do pamięci SRAM. W tym samym czasie rdzeń może realizować inne zadania, co finalnie również przekłada się na podniesienie wydajności układu.

Układy licznikowe reprezentowane są przez pięć typów timerów. Pierwszy typ to timery uniwersalne (ogólnego przeznaczenia), 32-bitowe oraz 16-bitowe. Drugim rodzajem układu licznikowego jest 16-bitowy, zaawansowany timer dysponujący dodatkowymi funkcjami



Rysunek 5. Zasoby zintegrowane w układzie STM32WL

eprasa.pl 85168ce91e

w porównaniu do timerów ogólnego przeznaczenia. Kolejnym rodzajem licznika jest LP-Timer, który jest lepszy energooszczędny od swoich standardowych odpowiedników oraz ma bardzo przydatną cechę w postaci możliwości cyklicznego wybudzania mikrokontrolera z trybu low-power. Ostatnimi rodzajami timera dostępnymi w STM32WL jest RTC (zegar czasu rzeczywistego) oraz watchdog.

Jeśli mowa o typowych zasobach mikrokontrolerowych, to należy wspomnieć również o interfejsach komunikacyjnych. Domena ta prezentuje się dość klasycznie – do dyspozycji są standardowe interfejsy takie jak SPI, I²C oraz U(S)ART. Grupę tę uzupełnia interfejs LP-UART, który może być aktywny w trybie low-power, umożliwiając odbiór danych, jak też wybudzenie układu.

Mocną stroną STM32WL są zasoby analogowe. Mamy do dyspozycji dwa przetworniki: A/C i C/A. Przetwornik A/C typu SAR ma domyślnie rozdzielczość 12 bitów, ale w razie potrzeby z pomocą sprzętowego oversamplingu możliwe jest rozszerzenie liczby bitów wyniku do 16. Przetwornik może pracować z szybkością do 2,5 Msps i dysponuje piętnastoma kanałami pomiarowymi (dwanaście połączonych z liniami I/O oraz trzy wewnętrzne: VREF, VBAT, czujnik temperatury). Przetwornik C/A charakteryzuje się rozdzielczością 12 bitów (możliwość redukcji do 8 bitów) oraz dysponuje jednym kanałem połączonym z linią I/O. Przydatnym elementem analogowym może okazać się inne peryferium – VREFBUF. Jest to źródło napięcia o konfigurowalnej wartości (do wyboru 2,048 V lub 2,5 V) i może służyć jako napięcie odniesienia (referencyjne) dla przetwornika A/C i komponentów zewnętrznych (poprzez pin VREF+). Zasoby analogowe uzupełniają komparatory, czujnik temperatury oraz interfejs do przycisków pojemnościowych.

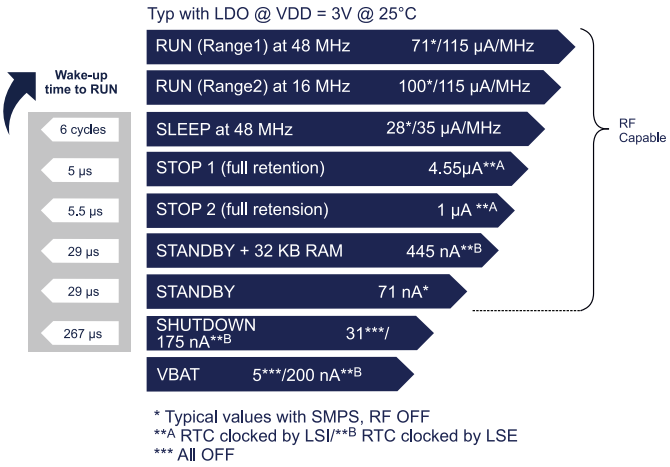
W układach STM32WL przewidziano również zasoby wpływające na bezpieczeństwo aplikacji. Składają się na nie: jednostka szyfrująca z algorytmem AES o długości klucza do 256 bitów, generator liczb losowych, moduł obliczający sumę kontrolną, zabezpieczenie zapisu i odczytu pamięci, unikalny identyfikator oraz generator publicznych kluczy.

Część radiowa układu STM32WL to nadajnik-odbiornik RF, który funkcjonalnie jest tożsamy z rozwiązaniem SX1261/2 firmy Semtech. Pozwala on na transmisję danych drogą radiową w paśmie 150...960 MHz. Komunikacja może odbywać się z użyciem jednej z następujących modulacji: LoRa, (G)FSK, (G)MSK oraz BPSK (tylko nadawanie). W warstwach wyższych możliwe jest zaimplementowanie własnego protokołu bądź używanie jednego ze standardów rynkowych, w tym np. LoRaWAN, Sigfox lub Wireless M-Bus. Radio udostępnia dwie końcówki mocy wyjściowej (do +22 dBm oraz do +15 dBm), co umożliwia spełnienie regulacji dotyczących maksymalnej mocy nadawania w rejonach na całym świecie. Co istotne, część radiowa dołączona jest do magistrali systemowej przez interfejs SPI. Oznacza to, że z punktu widzenia programisty STM32WL może być traktowany jak dwa oddzielne układy: mikrokontroler i układ radiowy, połączone interfejsem komunikacyjnym.

Idealne rozwiązanie do aplikacji energooszczędnych

Rdzeń i peryferia to nie jedyne elementy, które układy STM32WL zapożyczyły od mikrokontrolerów STM32L4. Bardzo zbliżony jest też blok zarządzania energią, dzięki czemu STM32WL to idealne układy do aplikacji zasilanych z baterii. Przyjrzyjmy się głównym rozwiązaniom z tego zakresu.

Jako pierwszą rzecz w aspekcie energooszczędności należy wymienić tryby pracy. Zestawienie z listą trybów pracy STM32WL, ich poborem prądu oraz czasem wybudzenia udostępniono na **rysunku 6**. Podstawowym trybem pracy jest tryb RUN, w którym kod aplikacji jest wykonywany oraz wszystkie zasoby mogą normalnie pracować. W trybie SLEEP rdzeń Cortex-M4 jest wyłączony, niemniej jednak zegary i peryferia mogą ciągle działać (np. Timer może wyzwalać przetwornik A/C, a moduł DMA transferować dane z przetwornika



Rysunek 6. Tryby pracy STM32WL wraz z poborem prądu oraz czasem wybudzenia

do pamięci SRAM). W trybach RUN i SLEEP można regulować częstotliwość pracy systemu, wpływając na wydajność i pobór prądu.

STOP1 i STOP2 to klasyczne tryby low-power, podczas których działanie peryferiów ogranicza się zasadniczo do czekania na zdarzenie, które wygeneruje przerwanie (np. interfejsy, timery, linie I/O) i spowoduje wybudzenie układu oraz wznowienie wykonania kodu. Tryby te oferują niski pobór prądu, krótki czas wybudzenia oraz pełne podtrzymanie zawartości pamięci SRAM.

STANDBY oraz SHUTDOWN to tryby o najniższych poborach prądu, co jednak wiąże się z pewnymi ograniczeniami: dłuższym czasem wybudzenia, mniejszą liczbą peryferiów mogących wybudzić układ, przynajmniej częściowym brakiem podtrzymania zawartości pamięci SRAM i koniecznością wykonania resetu w momencie wybudzenia. VBAT z kolei to specjalny tryb, który stosowany jest do podtrzymania domeny backup w warunkach, gdy główne zasilanie (linie VDD) jest odłączone.

Drugą funkcjonalnością, przydatną w aplikacjach low-power, są peryferia i ich efektywne wykorzystanie do wybudzania układu. W STM32WL wszystkie peryferia zdolne do generowania przerwania mogą wybudzać układ z trybu SLEEP lub STOP1. Nawet w trybie STOP2 pewna grupa peryferiów ma ciągle tę zdolność. Są to przede wszystkim: LP-UART (wybudzenie poprzez odbiór danych), LP-Timer (wybudzanie cykliczne co zdefiniowany interwał czasu), RTC (wybudzanie cykliczne co zdefiniowany interwał czasu lub jednorazowe wybudzenie – tak zwany alarm), komparator (wybudzenie po tym, jak napięcie na wejściu przekroczy określony poziom), watchdog (wybudzenie po upłynięciu zdefiniowanego czasu), linie EXTI (wybudzenie po zmianie poziomu sygnału na linii I/O).

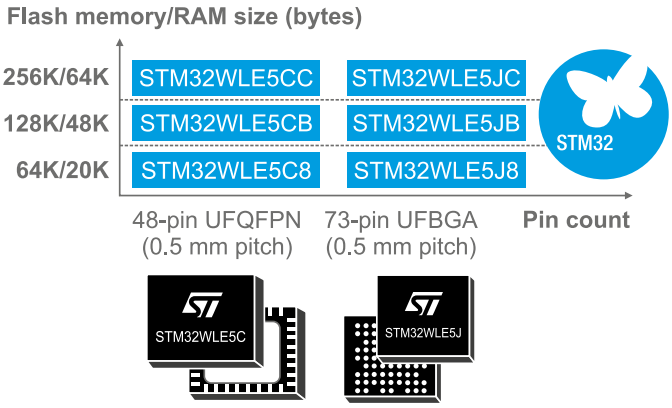
Trzecią rzeczą wartą wymienienia jest wewnętrzny obwód zasilania w STM32WL. W klasycznych mikrokontrolerach STM32 występuje regulator LDO. W nowszych seriach STM32, w tym w STM32WL do dyspozycji jest LDO oraz dodatkowo SMPS, a więc przetwornica napięcia. W trybie aktywnym mamy wybór, czy używać SMPS (niższy pobór prądu), czy LDO (mniejszy BOM). W trybach low-power wyboru już nie ma, gdyż STM32WL korzysta wtedy z LDO.

Oferta STM32WL

Rodzina układów STM32WL składa się z modeli, które różnią się od siebie kilkoma parametrami. Pierwszym z nich jest pojemność pamięci. Warianty są trzy i co należy podkreślić, skalowalna jest zarówno pamięć Flash, jak i SRAM. Najmniejszy pod względem pojemności pamięci układ ma 64 kB Flash oraz 20 kB SRAM. Wariant środkowy to 128 kB Flash oraz 48 kB SRAM. Finalnie układ z maksymalną pojemnością pamięci dysponuje 256 kB Flash oraz 64 kB SRAM.

Kolejny parametr rozróżniający układy STM32WL to rodzaj obudowy. Pierwszy typ to BGA73. Obudowa ta ma gabaryty 5×5 mm

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 7. Oferta układów STM32WL: dwa typy obudowy, trzy warianty pojemności pamięci

oraz raster (odległość pomiędzy kulkami) 0,5 mm. Obudowa udostępnia łącznie 73 piny (w tym 43 linie wejścia-wyjścia). Jest to ciekawa propozycja do aplikacji, w których liczą się małe rozmiary elektroniki oraz w których konieczne może być użycie wielu wyprowadzeń do podłączenia licznych elementów peryferyjnych. Drugi typ obudowy to QFN48. Obudowa ta ma gabaryty 7×7 mm oraz raster 0,5 mm. Obudowa oferuje łącznie 48 piny (w tym 29 linii wejścia-wyjścia). Specyfika obudowy QFN jest taka, że piny umieszczone są tylko na krawędziach obudowy, nie pod nią, jak ma to miejsce dla obudowy BGA. W konsekwencji rozprowadzenie ścieżek na płytce PCB jest prostsze, a co za tym idzie, projekt PCB jest mniej skomplikowany (mniej warstw i brak ślepych przelotek). Obudowa QFN48 jest zatem ciekawą alternatywą dla obudowy BGA73, na korzyść której przemawia niższy koszt płytki PCB. Dodatkowo montaż obudowy QFN i weryfikacja poprawnego przylutowania wyprowadzeń nie wymaga tak specjalistycznego sprzętu jak w przypadku obudowy BGA.

Każdy z typów obudowy oferuje trzy wcześniej wymienione warianty pojemności pamięci Flash/SRAM. Łącznie oferta STM32WL liczy zatem sześć układów. Co istotne, biorąc pod uwagę dany typ obudowy, układy z różną pojemnością pamięci są ze sobą kompatybilne pod względem zarówno sprzętowym (pin-to-pin), jak też programowym (kod aplikacji). Kompletną ofertę STM32WL pokazano na **rysunku 7**.

Podsumowanie

W ramach podsumowania przywołajmy najważniejsze zalety STM32WL zaprezentowane w artykule:

- STM32WL to pierwszy na świecie układ typu SoC łączący mikrokontroler z nadajnikiem-odbiornikiem radiowym Semtech. W efekcie jest to bardzo atrakcyjne rozwiązanie do aplikacji LoRa i LoRaWAN (pod względem ceny, poboru prądu, miniaturyzacji, BOM-u);
- Oprócz LoRa, STM32WL oferuje trzy inne modulacje, dzięki czemu jest to uniwersalny układ do aplikacji sub-GHz, chociażby do aplikacji Sigfox, Wireless M-Bus lub Mesh;
- STM32WL wykorzystuje w dużym stopniu rozwiązania z mikrokontrolerów STM32L4, a zatem jest to idealne rozwiązanie do aplikacji zasilanych z baterii;
- STM32WL to połączenie dwóch dobrze znanych podzespołów: STM32 i radia Semtech, dodatkowo zrealizowane wewnątrz krzemu w prosty sposób – interfejsem SPI. Osoby mające doświadczenie z tymi układami będą mogły szybko rozpocząć pracę z STM32WL;
- STM32WL to nie jeden układ, a rodzina układów. Do wyboru są dwa typy obudowy, w ramach których występuje efekt skalowalności pod względem pamięci Flash i SRAM, co pozwala wybrać wariant optymalny pod kątem wymagań danej aplikacji;
- STM32WL tak jak wszystkie układy STM32 objęty jest tak zwanym *longevity commitment*, a więc gwarancją produkcji 10 lat, odnawianą na początku każdego roku.

Firmy zainteresowane rozpoczęciem pracy z STM32WL zapraszamy do kontaktu z autorem artykułu.

Szymon Panecki
STMicroelectronics
szymon.panecki@st.com

REKLAMA

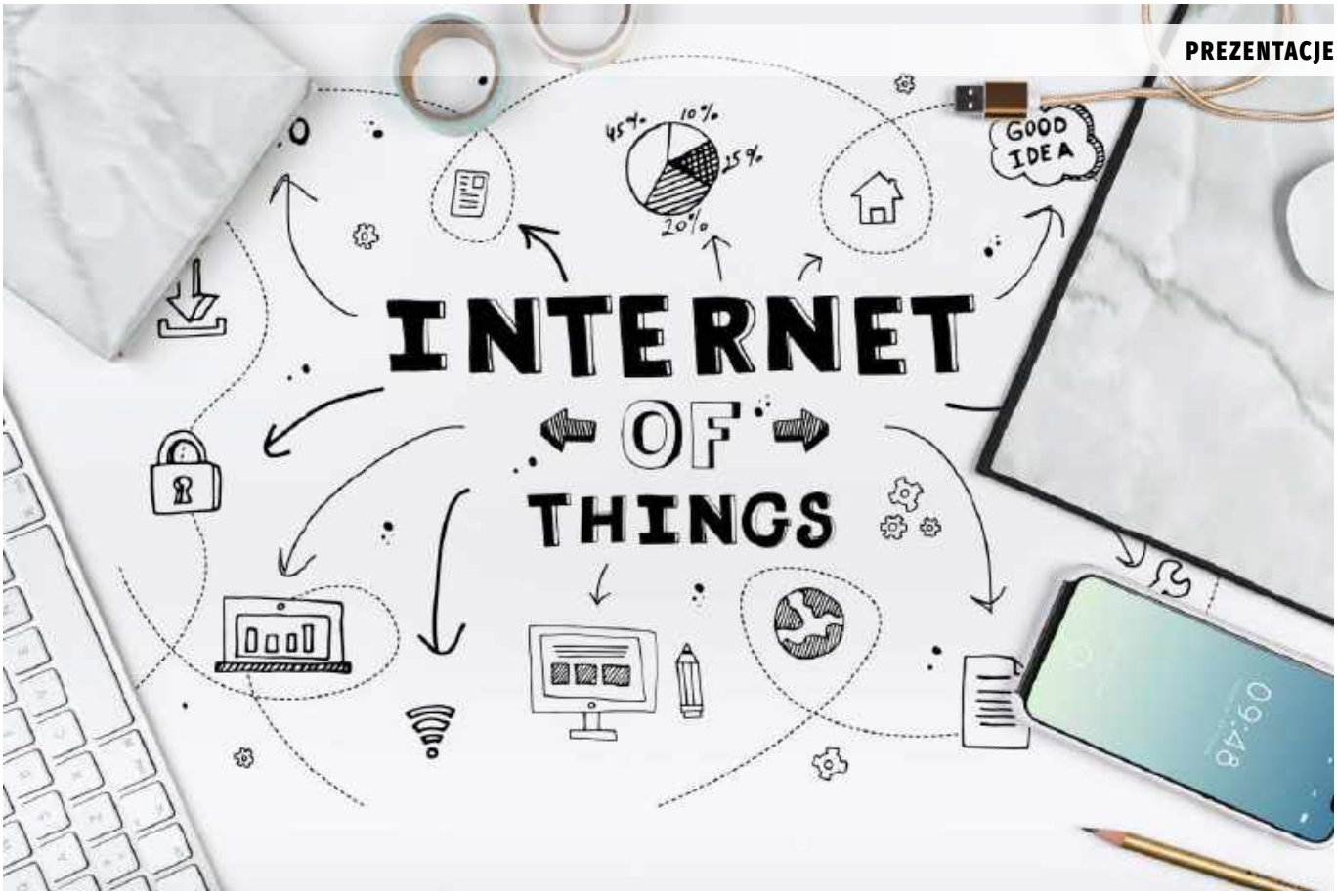
Wstąp do Klubu AVT Elektronika

będziesz miał prawo do korzystania z szeregu przywilejów:

- do 50% zniżki w Sklepie AVT
- darmowe prenumeraty Wydawnictwa AVT
- do 50% zniżki w Ulubionym Kiosku
- Zapraszamy do zapoznania się z zasadami Klubu!

http://bit.ly/2GaDwtQ

eprasa.pl 85168ce91e



Bezpieczne mikrokontrolery i moduły dla IoT

Rozwiązania Internetu Rzeczy wchodzą w kolejną fazę rozwoju. W dzisiejszych czasach nie chodzi głównie o wybranie najbardziej energooszczędnego standardu, ponieważ układy pod wieloma względami osiągnęły już granice technologiczne energooszczędności. Producenci zaczęli większą wagę przywiązywać do aspektów bezpieczeństwa danych oferowanych przez ich produkty.

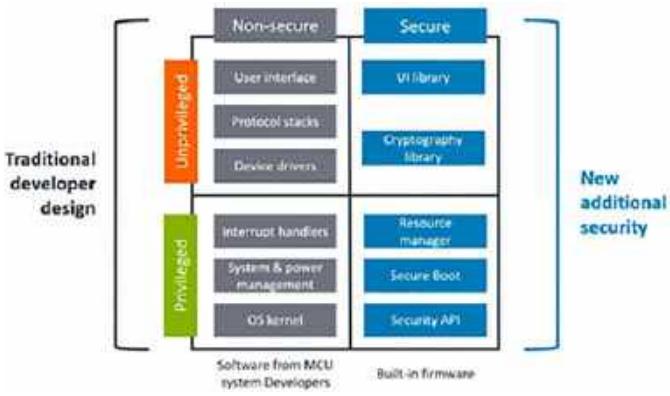
Momentem zwrotnym zarówno w dziedzinie bezpieczeństwa, jak i poprawy energooszczędności było wprowadzenie rozwiązań opartych na architekturze ARMv8-M, takich jak Cortex-M33. W dziedzinie bezpieczeństwa nowe układy oferują dostęp do szyfrowanej pamięci umożliwiającej przechowywanie danych krytycznych (**rysunek 1**).

ARM Cortex-M33 – krok w stronę bezpieczeństwa

Bezpieczeństwo danych w systemach IoT opiera się na czterech głównych aspektach. Są to:

- poufność – zagwarantowanie, że dane są odczytywane tylko przez docelowego odbiorcę,
- autentyczność – zapewnienie, że dane wysłane są przez oryginalne źródło,

Więcej informacji:
Computer Controls Sp. z oo
43-300 Bielsko-Biała, ul. Budowlanych 1
tel. +48 33485 94 90, info@ccontrols.pl
www.ccontrols.pl



Rysunek 1. Architektura układów ARMv8-M oferująca funkcjonalność TrustZone

eprasa.pl 85168ce91e

- integralność – zapewnienie, że informacja zawiera oryginalną i nienaruszoną wiadomość,
- niezaprzeczalność – zapewnienie, że cyfrowy podpis danych nie może zostać odrzucony.

Powyższe aspekty kryptografii danych w całości zapewnia nowa, architektura Cortex-M33 (**rysunek 2**), dostarczająca użytkownikowi możliwość bezpiecznego:

- debugowania kodu z użyciem funkcjonalności Lock/Unlock,
- uruchamiania oraz aktualizacji kodu,
- przechowywania kluczy szyfrujących,
- weryfikacji „użytkowników" sieci,
- detekcji włamania/sabotażu,
- generowania liczb losowych TRNG.

Dla zwiększenia bezpieczeństwa w rozwiązaniach istniejących, gdzie zmiana układu MCU jest zbyt kosztowna, projektanci mogą dalej zwiększyć bezpieczeństwo, stosując zewnętrzne układy autentykacji. W zależności od końcowej aplikacji oraz jej wymagań, do dyspozycji jest weryfikacja symetryczna oraz asymetryczna (**rysunek 3**).

Zaawansowane rozwiązania autentykacji oraz bezpieczeństwa danych

Maxim Integrated jest jednym z wiodących dostawców układów scalonych do weryfikacji oraz bezpieczeństwa danych. Portfolio producenta zawiera układy do autentykacji symetrycznej SHA-256 oraz niesymetrycznej ECDSA, które kilka lat temu zostały wzbogacone o mikrokontrolery z rodziny DeepCover. W zależności od aplikacji możemy zastosować odpowiednie rozwiązanie oraz sposób szyfrowania (**rysunek 4**).

Dobór układu autentykacji może na początku przysparzać wielu problemów. Bazując na zestawieniu z rysunku 4, możemy uporządkować wszystkie ważne kwestie. Projektując system lub urządzenie, należy dokonać analizy rodzaju ochrony, jaki musimy zapewnić dla danych urządzeń – punktów sieci, i na tej podstawie wybrać odpowiednie rozwiązanie. Właściwa analiza oraz wybór pozwolą na zbudowanie systemu odpornego na dostęp niepożądanych użytkowników. W zestawieniach pokazanych na **rysunku 5** i **rysunku 6** umieszczono najnowsze układy autentykacji symetrycznej (rysunek 5) oraz asymetrycznej (rysunek 6).

Pomimo bardzo dużych możliwości układów z rodziny produktów do autentykacji systemy złożone mogą wymagać dodatkowych funkcjonalności, takich jak szyfrowanie kodu aplikacji czy wsparcie dla komunikacji TLS. Przy wymagających aplikacjach projektanci mają do dyspozycji układy z rodziny DeepCover (**rysunek 7**). Jako jedne z nielicznych oferują one wsparcie dla pełnej komunikacji TLS, dostarczane przez producenta.

Rozwiązania bezprzewodowe dla popularnych standardów IoT

Silicon Laboratories jest jednym z czołowych dostawców rozwiązań bezprzewodowych dla Internetu Rzeczy. Swoje portfolio wzbogacił o układy oparte na architekturze Cortex-M33 oferujące zaawansowane bezpieczeństwo. Nowa rodzina układów EFR32xG21 oraz EFR32xG22, wspiera takie standardy jak Bluetooth, Thread, ZigBee i 2,4 GHz Proprietary, i bazuje na rdzeniu Cortex-M33 (**rysunek 8**). Nowe układy serii EFR32xG oferują nie tylko zaawansowaną funkcjonalność w kwestii bezpieczeństwa, ale również większą energooszczędność w porównaniu do poprzednich serii.

Rysunek 2. Funkcjonalności rdzeni Cortex-M33 zapewniające bezpieczeństwo danych

Security Services and Feature Implementation	Algorithm Method	
	Symmetric Key	Asymmetric Key
Confidentiality	Yes	Yes
Identification and Authentication	Yes	Yes
Integrity	Yes	Yes
Non-repudiation	Yes-Combined with public/private key algorithm	Yes
Encryption	Yes-Fast	Yes-Slow
Decryption	Yes-Fast	Yes-Slow
Overall Security	High	High
Key Management	Key Exchange and Securing the Key on both the Sender and Recipient side is needed	One party holds the private key: the sender (for asymmetric message authentication and decryption) or the receiver (for asymmetric encryption)
Algorithm Complexity	Easy to understand	Can be difficult to understand
Key Size	128 bits, 192 or 256 bits or longer but do not need to be as long as asymmetric key *(Depends on secrecy of keys)*	256 bits, 1024 bits, 2048, 3072 bits or longer. *Depends on the intractability (The amount of time and resources needed to solve)*
System Vulnerabilities	Improper key management, generation and usage	Improper implementation
Attack Approaches	Brute Force, Linear/Differential Cryptanalysis	Brute Force, Linear/Differential Cryptanalysis and Oracle

Rysunek 3. Porównanie właściwości autentykacji symetrycznej i niesymetrycznej

Requirements		DeepCover Secure Authentication ICs		DeepCover Secure Microcontrollers
		SHA-Based	ECDSA-Based	
Trust	Device authentication	✓	✓	✓
	Usage control/features enablement	✓	✓	✓
	Secure boot/download		✓	✓
IP Protection	Hardware and firmware anticloning	✓	✓	✓
	Firmware encryption			✓
Secure Communications	Certificate distribution and verification		✓	✓
	Packet encryption	✓	✓	✓
	Full TLS support			✓
	Small message encryption	✓	✓	✓

Rysunek 4. Zestawienie właściwości układów szyfrujących na potrzeby bezpieczeństwa IoT

eprasa.pl 85168ce91e

Zestawienie funkcjonalności z zakresu bezpieczeństwa zostało pokazane na **rysunku 9**. Pozwala ono na porównanie poszczególnych serii. Podobnie jak w przypadku układów autentykacji oraz DeepCover firmy Maxim Integrated, podczas analizy oraz projektowania systemu musimy dobrać rozwiązanie gwarantujące kompleksową ochronę zarówno danych, jak i komunikacji.

Układy SoC, SiP oraz moduły dla komunikacji Bluetoot, ZigBee, Thread oraz 2,4 GHz Proprietary

Produkty firmy Silicon Labs to zarówno układy System on Chip, jak i moduły w wersji System in Package oraz moduły jako standardowe PCB.

Bluetooth 5, 5.1, 5.2 AoA oraz AoD

Popularny standard komunikacji Bluetooth, dzięki wprowadzeniu na rynek stosu komunikacyjnego w wersji 5.2, który umożliwia lokalizację użytkowników w przestrzeni, zyskał nowe obszary zastosowań. Układy serii EFR32BG22 umożliwiają rozwijanie aplikacji wykorzystujących funkcjonalność AoA/AoD. Projektanci stosujący standard Bluetooth mają do dyspozycji zarówno układy SoC (**rysunek 10**), jak i w pełni certyfikowane moduły (**rysunek 11**).

W zależności od standardu oraz kluczowych cech aplikacji projektanci mają do wyboru układy należące do serii 1. oraz serii 2., które różnią się pomiędzy sobą wieloma aspektami. Na uwagę zasługuje pobór prądu przypadający na MHz, rdzeń układu, wsparcie dla kryptografii oraz maksymalna moc wyjściowa. Wybór rozwiązania zarówno spośród układów SoC, jak i modułów, jest możliwy tylko po przeanalizowaniu wszystkich kwestii.

ZigBee 3.0, OpenThread oraz Bluetooth 5.0, 5.1 – układy wieloprotokołowe

Rodzina produktów serii EFR32MG od zawsze umożliwia komunikację z użyciem wielu standardów bezprzewodowych. Pierwsza seria układów umożliwiała komunikację w standardach ZigBee, Thread, Bluetooth, 2,4 GHz Proprietary oraz SubGHz (oddzielny tor radiowy w serii EFR32MG13). W najnowszych rozwiązaniach drugiej serii – EFR32MG21 lub EFR32MG22, obsługiwana jest większość z tych standardów, jednak należy zapoznać się ze specyfikacją (**rysunek 12**). W celu zróżnicowania swoich rozwiązań, zarówno pod względem budowy systemu, jak i ceny, producent przygotował dwie nowe rodziny układów charakteryzujące się inną funkcjonalnością.

Podobnie jak w przypadku rozwiązań obsługujących standard Bluetooth, tutaj również dostępne są układy w wersji SoC, SiP oraz moduły PCB mające certyfikacje na dany rynek (**rysunek 13**). Dla takich branż, jak oświetlenie, firma Silicon Labs opracowała

Part Number	Type	Interface	Operating Voltage	User EEPROM	Package Options
DS28C22	Authenticator	I²C	3.3V	3kb	TDFN
DS2465	Coprocessor	I²C/1-Wire	3.3V	0.5kb	TSOC
DS28E15	Authenticator	1-Wire	3.3V	0.5kb	SFN, TSOC, TDFN
DS28E22				2kb	TSOC, TDFN
DS28E25				4kb	SFN, TO92, TSOC, TDFN
DS24L65	Coprocessor	I²C/1-Wire	1.8V	0.5kb	TSOC
DS28EL15	Authenticator	1-Wire		0.5kb	SFN, TDFN
DS28EL22				2kb	TDFN
DS28EL25				4kb	TDFN
MAX66240	Authenticator Transponder	NFC	Passive	4kb	SOIC, TDFN, 8-Bump WLP
MAX66242		NFC/I²C	Passive (optional 3.3V)		
MAX66300	Coprocessor Transceiver	NFC/UART/SPI	3.3V, 5V	1kb	TQFN

Rysunek 5. Układy autentykacji symetrycznej SHA-256

Part Number	Type	Interface*	User EEPROM	Package Option
DS28E38	Authenticator with ChipDNA	1-Wire	2kb	TDFN
DS28C36	Authenticator	I²C	4kb	TDFN
DS2476	Coprocessor	I²C	4kb	TDFN
DS28E35	Authenticator	1-Wire	1kb	TSOC, TDFN
DS2475	Coprocessor	I²C/1-Wire	—	SOT

Rysunek 6. Układy autentykacji asymetrycznej ECDSA

Part Number	Core	Frequency	Key Storage	USB	I²C	SPI	Symmetric Crypto	Asymmetric Crypto	Hash Algorithms
MAXQ1061	Built-in Firmware		Tamper-proof EEPROM		•	•	AES 128, 256	ECDSA P-256, P-384, P-521 ECDH	SHA-256, SHA-384, SHA-512
MAX32555	Cortex® M3	60MHz	Active tamper reaction	•	•	•	AES 128, 192, 256 3DES	RSA 1024, 2048 ECDSA P-256, P-384, P-521 ECDH	SHA-224, SHA-256, SHA-384, SHA-512
MAXQ1050	MAXQ30	20MHz	Active tamper reaction	•		•	AES 128, 192, 256	RSA 1024, 2048 ECDSA P-192, P-256	SHA-224, SHA-256

Rysunek 7. Mikrokontrolery rodziny DeepCover

Rysunek 8. Kluczowe cechy układów rodziny EFR32xG21 oraz EFR32xG22

Feature	Basic	+Root of Trust	+Secure Element	Secure Vault
TRNG with continuous health check	✓	✓	✓	✓
Crypto Engine	✓	✓	✓	✓
Secure Boot	✓	✓	✓	✓
Secure Boot with RTSL	-	✓	✓	✓
ARM® TrustZone®	-	✓	✓	✓
Debug Access Lock/Unlock	-	✓	✓	✓
DPA Countermeasures	-	-	✓	✓
Anti-Tamper	-	-	-	✓
Secure Attestation	-	-	-	✓
Secure Key Management	-	-	-	✓
Secure Key Storage	-	-	-	✓
Advanced Crypto	-	-	-	✓
	Series 1 – xG1x 90nm N4	Series 2 – xG22 40nm M33	Series 2 – xG21A 40nm M33	Series 2 – xG21B 40 nm M33

Rysunek 9. Porównanie funkcjonalności z zakresu bezpieczeństwa dla poszczególnych serii układów EFR32

eprasa.pl 85168ce91e

	Series 1 - xG13	Series 2 - xG21	Series 2 - xG22
Target applications	General purpose Bluetooth LE and mesh	Mains powered Bluetooth LE and mesh	Lowest power Bluetooth LE, Direction Finding and Bluetooth mesh (1Mb)
Bluetooth features	5.1 and mesh 1.0 (1M, 2M, LE Coded PHYs and AE)	5.1 and mesh 1.0 (1M, 2M, LE Coded PHYs and AE)	5.2 and Bluetooth mesh (1M, 2M, LE Coded PHYs, AE and AoA/D)
Proprietary 2.4G	1/2/4(GFSK, OOPSK)/8(MSK, DSSS, BPSK)/16(MSK, FSK, OOK)/32	N/A	2/4(GFSK, OOPSK), 8(MSK, OOPSK, DSSS)
TX / RX (1M, GFSK)	+19 dBm / -95.8 dBm	+20 dBm / -97.3 dBm	+6 dBm / -97 dBm
TX Current (8 dBm)	10.5 mA	9.05 mA	6.1 mA (3.4 mA @ -8 dBm)
RX Current (1M, GFSK)	9.1 mA	8.8 mA	5.8 mA
CPU / Clock Speed	Cortex M4 (38.4 MHz)	Cortex M33 (80MHz)	Cortex M33 (up to 76.8MHz) Cortex M0+ for radio
Flash (kB)	512	Up to 1024	Up to 512
RAM (kB)	64	Up to 96	32
Sleep Current (EM2)	1.3µA (16kB RAM)	4.5 µA (96 RAM)	1.3 µA (16kB RAM) - 1.8 µA (32kB RAM)
Active Current (1MB)	75µA/MHz	51µA/MHz	25µA/MHz
Security	2x AES-128/256, ECC, SHA-1/256/224, TRNG	AES-128/256, SHA-1/2 ECC, ECDSA and TRNG DPA countermeasures Secure boot with RTSL Secure debug with debug lock/unlock	AES-128/256, SHA-1/2 ECC, ECDSA and TRNG Secure boot with RTSL Secure debug with debug lock/unlock
Operating Voltage	1.8V – 3.6V	1.8V – 3.8V	1.71V – 3.6V
Packages (mm)	7x7 QFN48, 5x5 QFN32	6x6 QFN32 (20x QFN)	5x5 QFN40 (20x GPIO) 4x4 QFN32, TQFN32 (18x GPIO)

Rysunek 10. Porównanie układów serii EFR32BG firmy Silicon Labs

	BGM13P	BGM13S	BGM210P	BGM113L	BGM220P (Q3'20)	BGM220S (Q3'20)
Protocols	5.1 and mesh (1M, 2M, Coded PHY and AE)	5.1 and mesh (1M, 2M, Coded PHY and AE)	5.1 and mesh 1.0 (1M, 2M, Coded PHY and AE)	5.1 and mesh 1.0 (1M, 2M, Coded PHY and AE)	5.2 and mesh 1.0 (1M, 2M, Coded PHY, AE and AoA/D)	5.2 and mesh 1.0 (1M, 2M, Coded PHY, AE and AoA/D)
EFR32 SoC	BG13	BG13	BG21	BG21	BG22	BG22
Antenna	Built-in or U.FL	Built-in or RF pin	Built-in or RF pin	Built-in	Built-in	Built-in or RF pin
Max TX power	+8 / +19 dBm	+8 / +19 dBm	+10 / +20 dBm	+12.5 dBm	+6 dBm	+6 dBm
Sensitivity (1M)	-94.8 dBm	-94.1 dBm	-97 dBm	-97 dBm	-98 dBm	-98 dBm
Flash (kB)	512	512	1024	1024	512	512
RAM (kB)	64	64	96	96	32	32
GPIO	25	30	20	12	24,25	25
Operating Voltage	1.8V – 3.6V	1.8V – 3.6V	1.8 – 3.8V	1.8 – 3.8V	1.71V – 3.8V	1.71V – 3.8V
Operating Temp.	-40 to +85C	-40 to +85C	-40 to +125C	-40 to +125C	-40 to +105C	-40 to +105C
Dimensions W x L x H (mm)	12.0 x 15.0 x 2.2	6.5 x 6.5 x 1.4	12.0 x 15.0 x 2.2	12.0 x 15.0 x 2.2	12.0 x 15.0 x 2.2	6 x 6 x 1.3
Certifications	BT, CE, FCC, ISED, Japan, S Korea and Taiwan	BT, CE, FCC, ISED, Japan & S-Korea	BT, CE, FCC, ISED, Japan & S-Korea	BT, CE, FCC, ISED, Japan & S-Korea	BT, CE, FCC, ISED, Japan & S-Korea	BT, CE, FCC, ISED, Japan & S-Korea

Rysunek 11. Porównanie modułów Bluetooth firmy Silicon Labs

	Series 1 – MG12	Series 2 – MG21	Series 2 – MG22
Target applications	Mesh Routers and End Devices	Mesh Routers and End Devices	Zigbee End Devices only
Availability	Now	Now	Now
Zigbee features	Zigbee 3.0, Green Power, Concurrent Zigbee/Thread Multiprotocol (Zigbee/BLE)	Zigbee 3.0, Green Power, Concurrent Zigbee/Thread, Multiprotocol (Zigbee/BLE)	Zigbee 3.0 (SoC only), Green Power Green Power Device
Proprietary 2.4G	2/4(GFSK, OOPSK)/8(MSK, DSSS, BPSK)/16(MSK, FSK, OOK)/32	N/A	2/4(GFSK, 8(MSK, OOPSK, DSSS)
TX / RX (802.15.4)	+19 dBm / -102.7 dBm	+20 dBm / -104.5 dBm	+6 dBm / -102.3 dBm
TX Current	9.1 mA (@ 0 dBm)	9.3 mA (@ 0 dBm)	6.1 mA (@ 0 dBm), 8.2 mA (@+6 dBm)
RX Current (802.15.4)	11.9 mA	9.4 mA	3.9 mA
CPU / Clock Speed	Cortex M4 (38.4 MHz)	Cortex M33 (80MHz)	Cortex M33 (76.8MHz), Cortex M0+ for radio
Flash (kB)	1024	Up to 1024	Up to 512
RAM (kB)	256	Up to 96	32
Sleep Current (EM2)	1.5 µA (16kB RAM)	4.5 µA (96 RAM)	1.4 µA (32kB RAM)
Active Current (EM0)	70 µA/MHz	51 µA/MHz	28 µA/MHz
Security	2x AES-128/256, ECC, SHA-1/224/256, TRNG	AES-128/256, SHA-1/2, ECC, ECDSA and TRNG DPA countermeasures Secure boot with RTSL Secure OTA and secure debug unlock + Secure Enclave (SE128)	AES-128/256, SHA-1/2 ECC, ECDSA and TRNG Secure boot with RTSL Secure OTA and secure debug unlock
Operating Voltage	1.8V – 3.6V	1.71V – 3.8V	1.71V – 3.8V
Packages (mm)	7x7 QFN48	4x4 QFN32 (20x GPIO)	5x5 QFN40 (20x GPIO) 4x4 QFN32 / TQFN32 (18x GPIO)

Rysunek 12. Porównanie układów serii EFR32MG firmy Silicon Labs

	MGM12P	MGM13P	MGM13S	MGM210P	MGM210L
Protocols	Bluetooth 5.0 & mesh Zigbee or Thread	Bluetooth 5.1 & mesh Zigbee or Thread	Bluetooth 5.1 & mesh Zigbee or Thread	Bluetooth 5.1 & mesh Zigbee or Thread	Bluetooth 5.1 & mesh Zigbee or Thread
Status	Production	Production	Production	Production	Production
EFR32 SoC	xG12	xG13	xG13	xG21	xG21
Antenna	Chip or U.FL	Chip or U.FL	Chip or RF pin	Chip or RF pin	PCB trace antenna
Max TX power	+8 / +19 dBm	+8 / +19 dBm	+8 / +19 dBm	+10 / +20 dBm	+12.5 dBm
(250 kbps O-QPSK)	-95 dBm	-95 dBm	-94 dBm	-104.5 dBm	-104.5 dBm
TX (125 kbps GFSK)	N/A	-103.2 dBm	-102.1 dBm	-105 dBm	-105 dBm
(1Mbps GFSK)	-95 dBm	-95 dBm	-94 dBm	-97 dBm	-97 dBm
Flash / RAM	512 / 64 kB	512 / 64 kB	512 / 64 kB	1024 / 96 kB	1024 / 96 kB
GPIO	25	25	30	20	12
Operating Voltage	1.8 to 3.6 V	1.8 to 3.6 V	1.8 to 3.6 V	1.71 to 3.8 V	1.8 to 3.8 V
Operating Temperature	-40°C to +85°C	-40°C to +85°C	-40°C to +85°C	-40°C to +125°C	-40°C to +125°C
Dimensions W x L x H (mm)	12.9 x 15 x 2.2	12.9 x 15 x 2.2	6.5 x 6.5 x 1.4	12.9 x 15 x 2.2	10.5 x 22.5 x 2.3
Certifications	BT, CE, FCC, ISED, Japan, S Korea and Taiwan	BT, CE, FCC, ISED, Japan, S Korea and Taiwan	BT, CE, FCC, ISED, Japan & S Korea	BT, CE, FCC, ISED, Japan & S Korea	BT, CE, FCC, ISED, Japan & S Korea
Other	Options with LNA available	Pin compatible with xGM113	World Smallest IoT Solution	No LF XTAL	No LF XTAL

Rysunek 13. Porównanie modułów ZigBee firmy Silicon Labs

moduł MGM210L, który może być łatwo wbudowany w docelowe urządzenie.

Z-Wave odświeżony standard oraz nowa rodzina produktów

Firma Silicon Labs, po przejęciu firmy Sigma Design, wprowadziła na rynek dwa nowe układy bazujące na serii SoC EFR32ZG, pracującej w zakresie częstotliwości SubGHz. Standard Z-Wave został w 2017 roku odświeżony i wprowadzony jako wersja Z-Wave S2 oferująca większe bezpieczeństwo w zakresie komunikacji wewnątrz sieci oraz identyfikacji nowych urządzeń. Obecnie wszystkie nowe produkty rozwijane są na układach serii ZGM130S lub EFR32ZG14 (**rysunek 14**).

Wi-Fi Low Power – najpolularniejszy standard komunikacji w wersji niskomocowej

Moduły WF200 oraz WFM200 umożliwiły projektantom urządzeń nowe podejście do projektowania układów zasilanych bateryjnie, wyposażonych w komunikację Wi-Fi. Parametry układów (**rysunek 15** i **rysunek 16**) pozwalają na projektowanie urządzeń oraz systemów, które mogą cyklicznie transmitować pakiety w standardzie Wi-Fi. Mocną stroną obu rozwiązań są bardzo niskie prądy uśpienia oraz wyłączenia, pozwalające maksymalizować czas pracy na baterii.

W kwestii bezpieczeństwa obydwa rozwiązania pozwalają na tworzenie aplikacji

Rysunek 14. Rozwiązania dla standardu Z-Wave

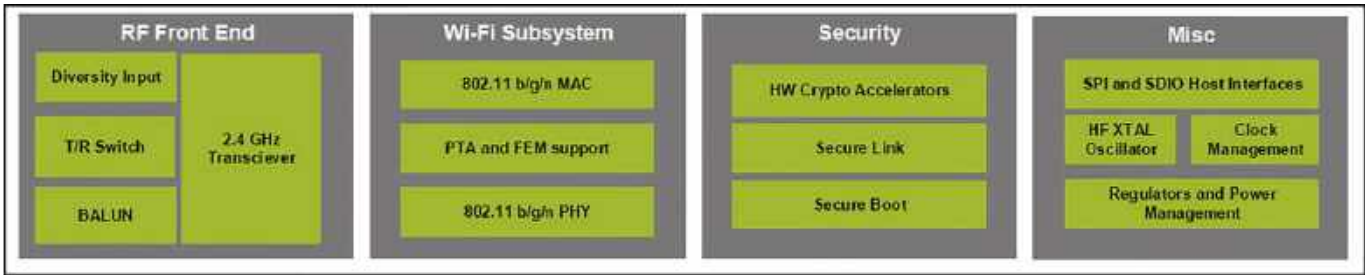
Power Consumption
- Rx (@1DSSS): 41.6 mA
- Tx (17 dBm @1DSSS): 152.6 mA
- Associated: DTIM3: 298 µA
- Sleep: 22 µA
- Power off: < 0.5 µA

Rysunek 15. Pobór prądu w układzie WF200

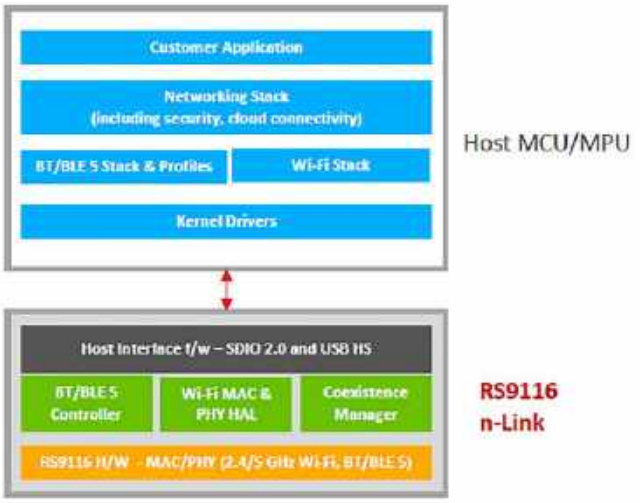
Power Consumption
- Rx (@DSSS-1Mbps): 42.3 mA
- Tx (15.1 dBm @DSSS-1Mbps): 145 mA
- Associated DTIM3 average current: 298 µA
- Associated Sleep Current: 22 µA
- Shutdown mode: 0.5 µA

Rysunek 16. Pobór prądu w układzie WFM200

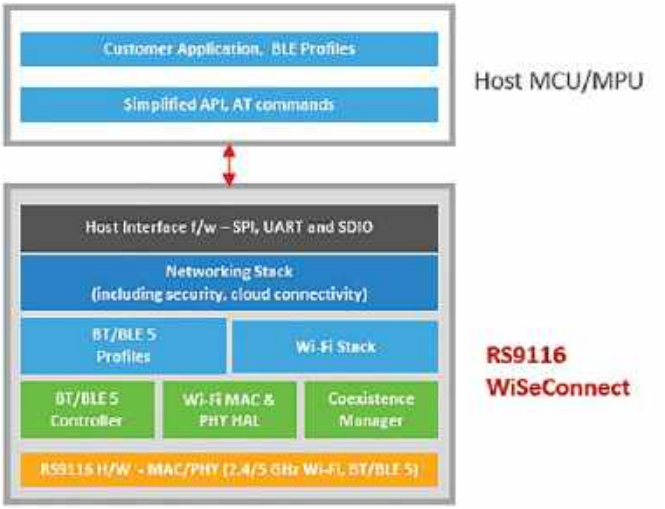
eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 17. Diagram blokowy budowy układów WFM200S oraz WF200S



Rysunek 18. Diagram blokowy budowy układu RS9116 n-Link



Rysunek 19. Diagram blokowy budowy układu RS9116 WiSeConnect

odpornych na zewnętrzne ataki dzięki wbudowanym funkcjom bloku zabezpieczeń (**rysunek 17**).

Wi-Fi + Bluetooth, układy łączące dwa popularne standardy

Przejęcie firmy Redpine Signals przez Silicon Labs wzbogaciło rozwiązania producenta o układy Wi-Fi dwuzakresowe, integrujące również komunikację Bluetooth. Rozwiązania Redpine Signals obejmują układy RS9116 wersji n-Link (**rysunek 18**) oraz WiSeConnect (**rysunek 19**). Obydwie wersje się miejscem implementacji stosu sieciowego, protokołów oraz specyfikacją dla host MCU/MPU.

Podsumowanie

Projektanci aplikacji oraz systemów bezprzewodowych, oprócz dobrania właściwego protokołu, muszą również przeanalizować dostępne rozwiązania pod kątem kluczowych wymagań aplikacji. Zadanie nie jest łatwe, biorąc pod uwagę liczbę dostępnych układów oraz przyzwyczajenia projektantów, którzy nierzadko bazują na rozwiązaniu znanym z poprzednich projektów.

Implementacja nowej konfiguracji jest dla wielu bardzo trudna już na etapie wyboru, gdzie zwykle należy nauczyć się technologii producenta, zdobyć potrzebną wiedzę oraz wsparcie. Dlatego projektanci coraz częściej korzystają ze wsparcia inżynierów aplikacyjnych, posiadających wiedzę w zakresie technologii danych dostawców. Ponadto wiele informacji dostępnych jest po podpisaniu umów poufności lub wymaga dostarczenia szczegółowych danych do producenta. Korzystanie ze wsparcia inżynierów aplikacyjnych oraz sprzedaży dystrybutora znacznie skraca i upraszcza proces rozpoczęcia pracy przy nowych projektach.

Kamil Prus
Business Development Manager
Field Application Engineer Poland
Computer Controls Sp. z o.o.
https://www.ccontrols.net/pl/

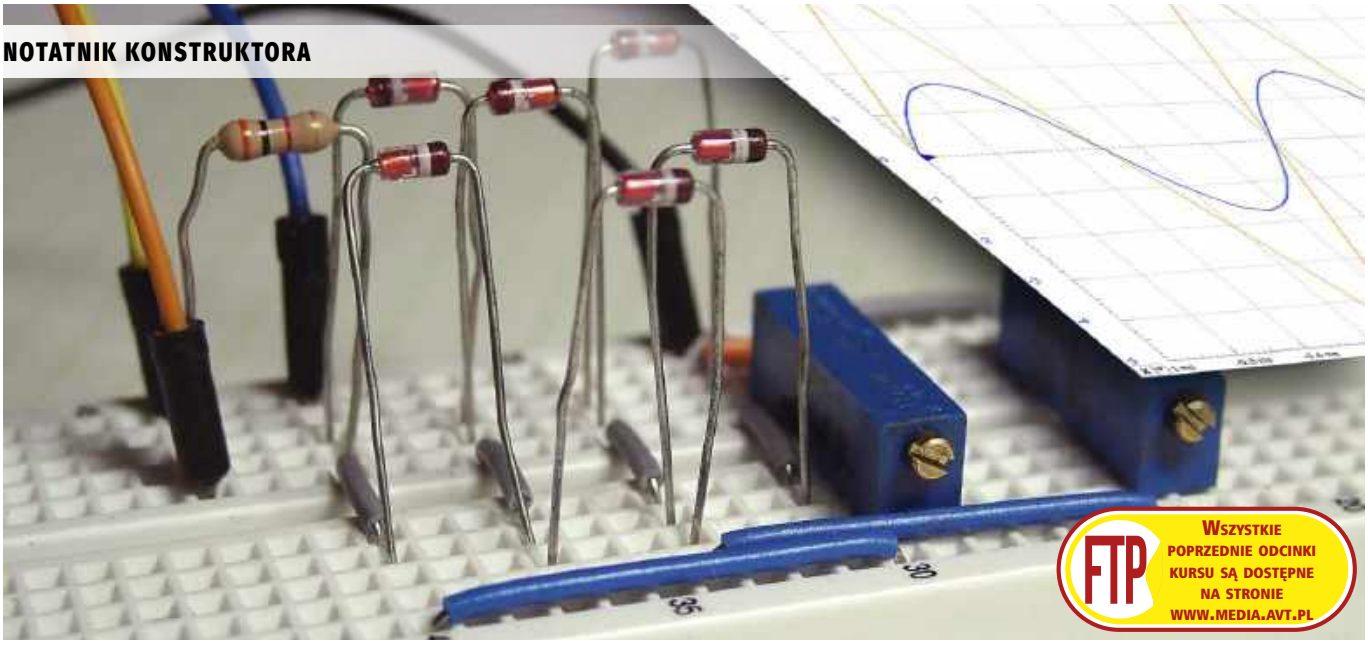
REKLAMA

ELEKTRONIKA PRAKTYCZNA MATERIAŁY DODATKOWE MEDIA

Aby skorzystać z materiałów dodatkowych dołączonych do numeru, należy:

1. Wejść na stronę **www.media.avt.pl**,
2. Zarejestrować się lub zalogować,
3. Wybrać wydanie „Elektroniki Praktycznej", które ma trafić do biblioteki osobistej,
4. Odpowiedzieć na proste pytanie dotyczące bieżącego numeru,
5. Pobrać pliki.

eprasa.pl 85168ce91e



FTP
WSZYSTKIE POPRZEDNIE ODCINKI KURSU SĄ DOSTĘPNE NA STRONIE WWW.MEDIA.AVT.PL

Symulacja i pomiar, czyli LTspice i Analog Discovery 2 w rękach konstruktora (16)

Generowanie przebiegu sinusoidalnego

W ostatnim odcinku zajmowaliśmy się problemem stabilności układów elektronicznych. Poznaliśmy warunki, jakie powinien spełniać układ, aby był stabilny. Zapoznaliśmy się z pojęciami marginesu fazy i amplitudy. A jeśli układ jest niestabilny...? To spełnia warunki generacji i oscyluje.

Warunek generacji – parametr, który jak wynika z jego definicji, musi być spełniony do wzbudzenia drgań. To sprzymierzeniec elektronika konstruktora, ale też jego wróg. Jakże często zdarza się, że gdy chcemy, by jakiś układ generował, ma on problemy ze wzbudzeniem się i odwrotnie, wzmacniacze bardzo chętnie wchodzą w stan oscylacji. Chociaż wykorzystanie warunku generacji to bardzo dobra metoda uzyskania czystej, niezniekształconej sinusoidy, nie będziemy podążać tą drogą. Generatory można konstruować również w oparciu na zupełnie innych zasadach. Naszym celem w tym odcinku będzie dążenie do uzyskania jak najczystszego sygnału sinusoidalnego. Sprawdzimy, która z metod da zadowalające wyniki. Nie zawsze generowanie sinusoidy jest procesem czysto analogowym.

Metoda I

Wyobraźmy sobie generator zbudowany na zasadzie zilustrowanej na **rysunku 1**. Mamy tu źródło prądowe, w którym może być zmieniane natężenie prądu oraz jego kierunek. Prąd tego źródła w zależności od kierunku ładuje lub rozładowuje kondensator C. Napięcie na kondensatorze jest równe:

$$U_c = \frac{Q}{C}$$

ale ładunek można powiązać z prądem zależnością:

$$i = \frac{dq}{dt}$$

stąd

$$dq = idt$$

$$Q = \int_{t1}^{t2} i(t)\,dt$$

Jeśli zapewnimy stałoprądowe ładowanie (i rozładowanie) kondensatora, to:

$$Q = \int_{t1}^{t2} Idt = It$$

gdzie t jest czasem ładowania kondensatora od t1 do t2.

Zatem napięcie na kondensatorze jest opisane zależnością:

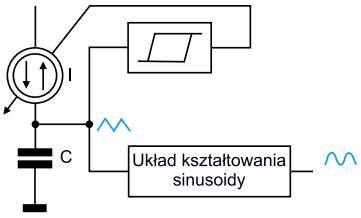
$$U_c = \frac{It}{C}$$

i jak widać, jest to zależność liniowa. Szybkość ładowania kondensatora o pojemności C zależy tylko od prądu.

Liniowo narastające napięcie kondensatora jest podawane na wejście przerzutnika Schmitta. Przyjmiemy, że jego wyjście po włączeniu zasilania jest w stanie niskim, co powoduje przepływ prądu w kierunku ładującym kondensator C. Po osiągnięciu górnego napięcia progowego następuje zmiana stanu wyjścia przerzutnika, wywołując

eprasa.pl 85168ce91e

tym samym zmianę kierunku przepływu prądu ze źródła. Od tego momentu kondensator jest stałoprądowo rozładowywany, a więc napięcie na nim maleje liniowo. Po przekroczeniu dolnego napięcia progowego ponownie następuje przerzut i zmiana kierunku przepływu prądu. Wracamy zatem do punktu wyjścia i jak widać, układ będzie generował napięcie trójkątne występujące na kondensatorze. Częstotliwość przebiegu zależy wyłącznie od prądu płynącego przez kondensator. Generator jest więc przestrajany poprzez zmianę wydajności źródła prądowego. Przebiegi w charakterystycznych punktach układu pokazano na **rysunku 2**. Nie będziemy się teraz szczegółowo zajmować poszczególnymi blokami takiego generatora. Mają one elementarną i dość prostą budowę. Kompletując je w całość, otrzymalibyśmy gotowe urządzenie.

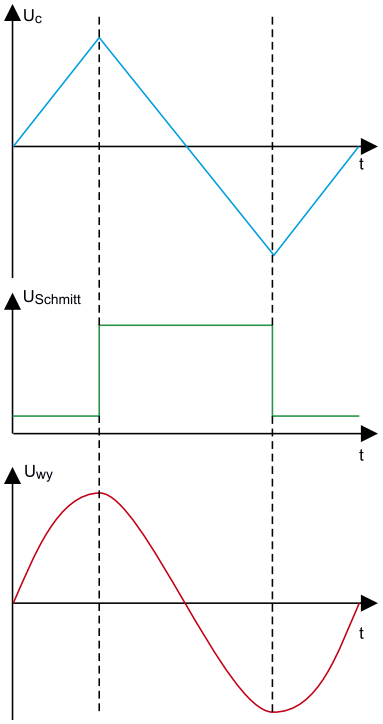


Rysunek 1. Ilustracja zasady działania generatora z diodowym układem kształtowania sinusoidy

W sposób bardziej lub mniej zamierzony zbudowaliśmy generator funkcyjny. Generuje on na pewno dwa podstawowe przebiegi, tj. trójkąt i prostokąt, nad trzecim (sinusoidalnym) trzeba będzie jeszcze trochę popracować.

Można oczywiście wymyślić metodę filtrowania przebiegu prostokątnego. Wykorzystalibyśmy w niej fakt, że jest złożeniem wielu nieparzystych harmonicznych, teoretycznie nieskończonej ich liczby. Amplitudy maleją odwrotnie proporcjonalnie do numeru danej harmonicznej. Metoda stosunkowo prosta i warta sprawdzenia, jak jest skuteczna, co uczynimy w dalszej części artykułu. Ma jednak jedną podstawową, w zasadzie dyskwalifikującą wadę – konieczność stosowania przestrajanego filtru. Nie jest to nie do zrobienia, ale drastycznie komplikuje budowę urządzenia. Widzimy natomiast, że przebieg trójkątny bardzo przypomina sinusoidę. A gdyby tak obciąć go od góry i od dołu?

No nie. Raczej nie idźmy tą drogą, chociaż znane są aplikacje, w których takie podejście jest stosowane. Użytkownicy samochodów lubiący jeździć na biwaki w rejony nieucywilizowane prawdopodobnie mieli do czynienia z przetwornicami stałego napięcia akumulatorowego na napięcie zmienne stanowiące substytut napięcia sieciowego 230 V. W większości takich urządzeń generowane jest napięcie trapezoidalne zamiast sinusoidalnego i jak widać, podejście to sprawdza się w praktyce. Zobaczmy, jak bardzo przebieg trapezoidalny odbiega od sinusoidalnego. Zastosujemy oczywiście metodę symulacji. Wygenerujemy trzy przebiegi: trójkątny i dwa trapezoidalne. Aby sprawdzić, jak bardzo różnią się od czystej sinusoidy, zmierzymy zawartość harmonicznych. Sprawdzimy, jak na zwartość harmonicznych wpłynie poziom obcięcia wyjściowego przebiegu trójkątnego.



Rysunek 2. Przebiegi w charakterystycznych punktach generatora

Do wygenerowania przebiegów zastosujemy źródło napięciowe PWL z nieudokumentowaną opcją `REPEAT FOREVER`. Definicja dla przebiegu trójkątnego jest następująca:

```
PWL repeat forever(0 0 200u 8 +400u -8 +200u 0)endrepeat
```

W powyższym zapisie kolejne pary liczb oznaczają czas i odpowiadające mu napięcie sygnału. Możliwy jest zapis bezwzględnych lub przyrostowych wartości czasu. W drugim przypadku odniesieniem jest poprzedni punkt zapisu. Jeśli definicja ma dotyczyć przebiegu okresowego, wystarczy utworzyć ujęte w nawias punkty opisujące jeden pełny okres, a poza nawiasami dopisać opcje `FOREVER` i `ENDREPEAT`. Definicje przebiegów trapezoidalnych są następujące:

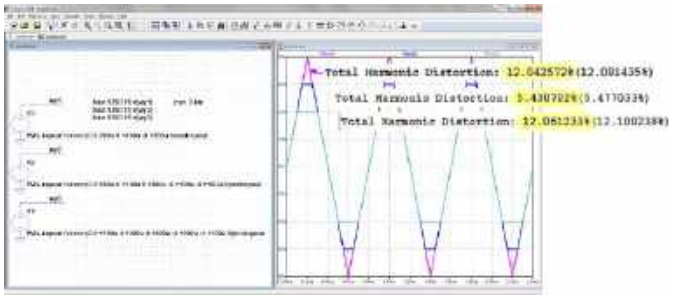
```
PWL repeat forever(0 0 150u 6 +100u 6 +300u -6 +100u
-6 +150u 0)endrepeat
PWL repeat forever(0 0 +100u 4 +200u 4 +200u -4
+200u -4 +100u 0)endrepeat
```

Przebieg ma okres 800 µs, a więc jego częstotliwość jest równa 1250 Hz. Do analizy harmonicznych zastosujemy funkcję `.four`. Konieczne jest wprowadzenie 3 komend, niezależnie dla każdego wyjścia:

```
.four 1250 11 v(wy1)
.four 1250 11 v(wy2)
.four 1250 11 v(wy3)
```

W komendzie podana jest częstotliwość podstawowa (1250 Hz) oraz liczba analizowanych harmonicznych włącznie z pierwszą. Wyniki pokazano na **rysunku 3.** Współczynnik zawartości harmonicznych odczytujemy komendą „View → SPICE Error Log" powodującą wyświetlenie okna z interesującymi nas informacjami. Odczytujemy z nich, że:

- dla przebiegu trójkątnego THD=12,04%,
- dla przebiegu z wyjścia „wy2" THD=5,43%,
- dla przebiegu z wyjścia „wy3" THD=12,06%.



Rysunek 3. Wyniki symulacji generatora z diodowym układem kształtowania sinusoidy

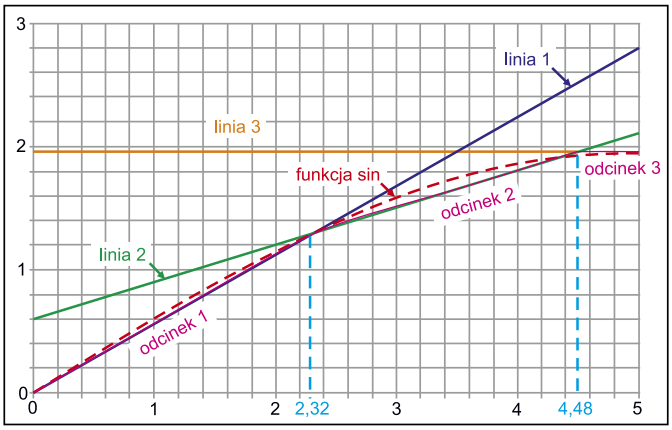
Jak widać, dla odpowiednio dobranego poziomu przycięcia przebiegu trójkątnego można uzyskać zawartość harmonicznych na poziomie kilku procent. O ile w pewnych zastosowaniach technicznych jest to wartość do zaakceptowania, o tyle gdybyśmy chcieli użyć takiego generatora jako przyrządu pomiarowego, byłaby to całkowita klapa. Czy można więc coś z tym zrobić?

Okazuje się, że można, choćby przez zastosowanie diodowych układów kształtujących. Zaprojektujemy teraz taki układ, sprawdzimy go w symulacji, a następnie w praktyce.

Ze względu na symetrię sinusoidy wystarczy nam analiza tylko jednej ćwiartki: od 0 do $\pi/2$. Zakładamy, że przebieg trójkątny, z którego tworzymy sinusoidę ma amplitudę 5 V. Przyjmujemy również, że sinusoida będzie aproksymowana 3 odcinkami, tak jak to pokazano na **rysunku 4**. Dokładny (matematyczny) przebieg jest na nim zaznaczony kolorem czerwonym. Wyboru nachylenia poszczególnych odcinków oraz punktów przegięcia dokonujemy arbitralnie, wpasowując je ręcznie na wykresie. Należy podkreślić, że pracujemy na charakterystyce przejściowej, a więc zależności napięcia wyjściowego od wejściowego. Schemat ideowy układu pokazano na **rysunku 5**.

Dla małych napięć wejściowych wszystkie diody są wyłączone. W układzie istotne są tylko rezystory R i R1 (**rysunek 6**). Z rysunku 4 wynika, że pierwszy odcinek powinien mieć nachylenie k_1=0,56 V/V. Taka więc powinna być transmitancja dzielnika R, R_1.

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 4. Graficzna metoda projektowania diodowego układu kształtowania sinusoidy

Przyjmując rezystancję R równą 3 kΩ, obliczamy R_1:

$$k_1 = \frac{R_1}{R_1 + R}$$

Po przekształceniach:

$$R_1 = \frac{k_1 R}{1 - k_1} = 3{,}818\ \text{k}\Omega$$

Pierwsze wejściowe napięcie progowe jest równe:

$$U_{we_{p1}} = \frac{2U_F}{k_1} = 2{,}32\ \text{V}$$

gdzie U_F napięcie przewodzenia diody równe 0,65 V.

Odcinek 1. pokrywa się z linią 1:

$$U_{wy} = \frac{R_1}{R_1 + R} U_{we}$$

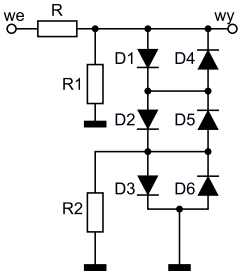
Zwiększając napięcie wejściowe, dochodzimy do momentu, w którym zaczynają przewodzić diody D_1 i D_2 (D_4 i D_5 dla napięć ujemnych). Dioda D_3 jest bocznikowana rezystorem R_2, więc aby weszła w stan przewodzenia, wymagane jest wyższe napięcie wejściowego. Przewodzące diody można traktować jak źródła napięciowe o napięciu U_F. Schemat zastępczy dla tego przypadku jest pokazany na **rysunku 7.** Dla lepszej czytelności uwzględniono tylko elementy dla dodatnich napięć wejściowych. Ponieważ w obwodzie występują dwa źródła napięciowe, do obliczenia napięcia wyjściowego korzystamy z zasady superpozycji. Ostatecznie jest ono równe:

$$U_{wy2} = U_{we} \frac{R_1 \| R_2}{R_1 \| R_2 + R} + 2U_F \frac{R \| R_1}{R \| R_1 + R_2} \quad (1)$$

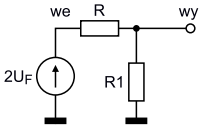
Jak widać, napięcie to zmieniło na charakterystyce nachylenie i dodatkowo uległo przesunięciu. Obowiązujący w tym stanie współczynnik kierunkowy dla linii 2 jest równy:

$$k_2 = \frac{R_1 \| R_2}{R_1 \| R_2 + R}$$

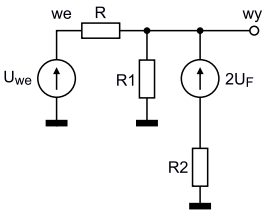
Z wykresu szacujemy ten współczynnik dla 2. odcinka na 0,3. Przekształcamy więc powyższe wyrażenie tak, aby obliczyć z niego R_2:



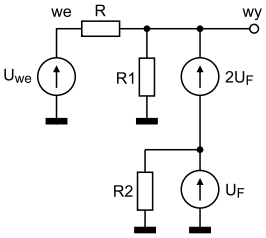
Rysunek 5. Schemat ideowy diodowego układu kształtowania sinusoidy



Rysunek 6. Schemat zastępczy układu dla napięcia wejściowego niższego od ok. $2U_F$



Rysunek 7. Schemat zastępczy układu dla napięcia wejściowego z zakresu $2U_F<U_{we}<3U_F$



Rysunek 8. Schemat zastępczy układu dla napięcia wejściowego wyższego od ok. $3U_F$

$$k_2 = \frac{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R} = \frac{R_1 R_2}{R_1 R_2 + R(R_1 + R_2)}$$

$$R_2 = \frac{k_2 R R_1}{R_1 - k_2 (R + R_1)}$$

Stąd po podstawieniu wartości otrzymujemy R_2=1938 Ω.

Dalsze zwiększanie napięcia wejściowego spowoduje włączenie diody D_3. Od tego momentu obowiązuje schemat zastępczy pokazany na **rysunku 8**. Wynika z niego, że powyżej napięcia progowego U_{wep2} napięcie wyjściowe jest równe $3U_F$=1,95 V. Odpowiadające mu napięcie wejściowe obliczamy z zależności (1), podstawiając do niego: U_{wy2}=1,95 V i obliczone wartości rezystorów. Otrzymujemy U_{wep2}=4,48 V.

Wszystko już jest obliczone, możemy przystąpić do symulacji. Najpierw sprawdzimy, jak obliczona charakterystyka przejściowa wygląda w układzie z elementami fizycznymi. Musimy pamiętać, że w obliczeniach jako model diody przyjmowaliśmy idealne źródło napięciowe włączane skokowo po przekroczeniu określonego napięcia progowego. Tymczasem prawdziwa dioda jest włączana stopniowo, a jej napięcie przewodzenia zmienia się też w pewnym zakresie w miarę zwiększania prądu. Symulacja obejmie 3 obwody obowiązujące w rozważnych w obliczeniach zakresach napięcia wejściowego, a także jeden model układu fizycznego. Schemat układu symulowanego wraz z wynikami pokazano na **rysunku 9.** W modelu układu fizycznego zastosowano dostępne w bibliotece LTspice'a krzemowe diody przełączające BAV170HM. Plik symulacji *ch_ka_przejsciowa.asc* jest dostępny w materiałach uzupełniających do artykułu.

Symulacja pokazała, że uzyskano całkiem niezłą zgodność modelu obliczeniowego z modelem zawierającym elementy fizyczne. Jedynie w zakresie powyżej 2. punktu progowego charakterystyka układu z elementami fizycznymi w widocznym stopniu odbiegała od modelu obliczeniowego. Ciekawe, jak zachowa się układ rzeczywisty w pomiarze?

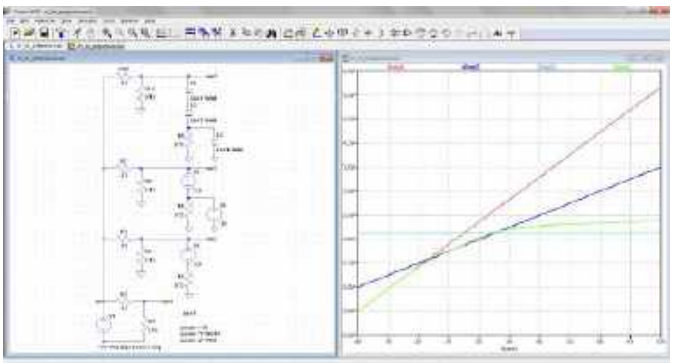
Symulacja działania diodowego układu kształtującego

Układ mamy już zaprojektowany, przyszła więc kolej na sprawdzenie, jaka będzie jego odpowiedź na wejściowy przebieg trójkątny o amplitudzie 5 V (zgodnie z założeniami obliczeń). Najpierw, tak jak zwykle, poddamy go symulacji. Schemat układu kształtującego wraz z wynikami symulacji pokazano na **rysunku 10.**

Źródło sygnału wejściowego jest zdefiniowane jak niżej:

```
PULSE({-um} {um} 0 .5m .5m 0 1m)
```

Amplitudę określono parametrycznie, aby możliwe było łatwe badanie jej wpływu na przebieg wyjściowy. Domyślnie jest opisana jako: `.param um 5`, a więc ma wartość 5 V. Wejściowy przebieg trójkątny ma czas narastania 0,5 ms i czas opadania 0,5 ms. Okres tego przebiegu jest równy 1 ms, co odpowiada częstotliwości 1 kHz. Przebieg

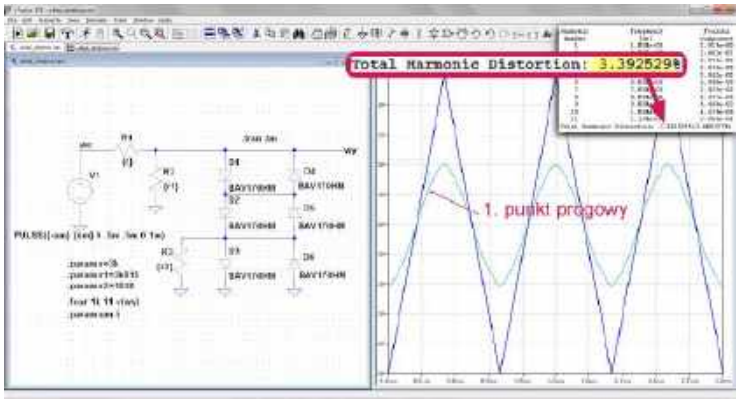


Rysunek 9. Schemat symulowanego układu diodowego układu kształtowania sinusoidy wraz z wynikami parametrów obliczeniowych

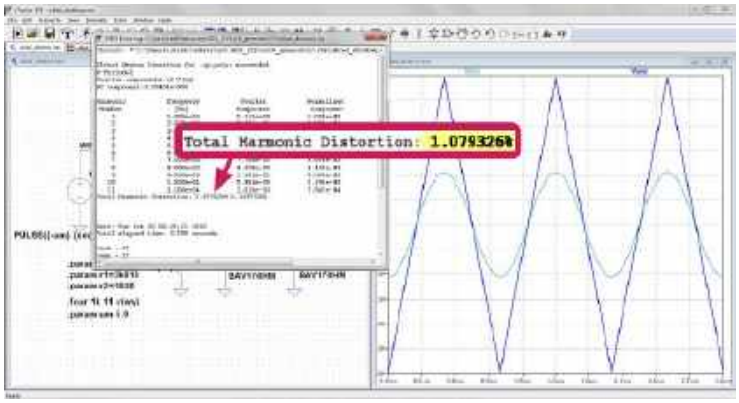
eprasa.pl 85168ce91e

wyjściowy ma kształt zbliżony do sinusoidy, ale można dość wyraźnie zaobserwować 1. punkt progowy odpowiadający napięciu wejściowemu nieco ponad 2 V.

W symulacji uwzględniono pomiar zawartości harmonicznych, tak jak robiliśmy to wcześniej, tylko teraz częstotliwość jest równa 1 kHz. Okazało się, że zawartość harmonicznych przebiegu wyjściowego jest równa 3,39%. Hm. Rewelacji nie ma. Wcześniej zwróciliśmy uwagę na to, że charakterystyka przejściowa układu kształtującego przebiegała wyraźnie powyżej charakterystyki obliczeniowej, spróbujmy zatem podwyższyć nieco amplitudę wejściową, np. do 5,9 V (**rysunek 11**). Teraz przebieg wygląda znacznie lepiej, co znajduje również odzwierciedlenie w zawartości harmonicznych. THD jest równe 1,08%, a to już można uznać za wynik całkiem niezły. Pora na pomiary układu rzeczywistego.



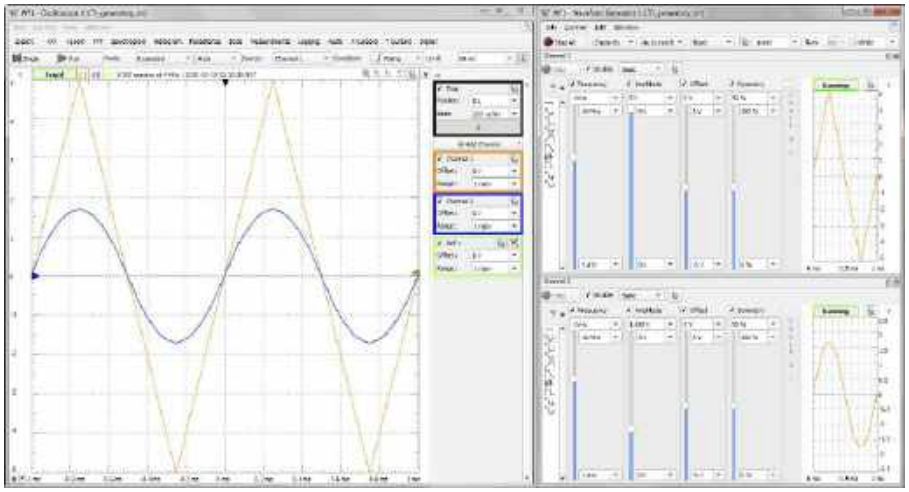
Rysunek 10. Wyniki symulacji układu diodowego układu kształtowania sinusoidy



Rysunek 11. Wyniki symulacji układu diodowego układu kształtowania sinusoidy z podwyższonym napięciem wejściowym

Pomiar diodowego układu kształtującego sinusoidę

Rzeczywisty układ budujemy dokładnie według schematu z symulacji. W testowanym układzie znalazły się wyciągnięte z głębokiego lamusa diody BAVP17 (może BAVP19). Źródłem wejściowego przebiegu trójkątnego jest 1. kanał generatora arbitralnego. Ustawiamy amplitudę 5 V i częstotliwość 1 kHz. Rezystory R_1 i R_2 w układzie pomiarowym zostały zastąpione potencjometrami wieloobrotowymi, na których ustawiono wartości wynikające z obliczeń. Uruchamiamy generator i oscyloskop. Wyniki pokazano na **rysunku 12**. Dla lepszej weryfikacji wzrokowej przebiegu wyjściowego, kanał 1. oscyloskopu został na chwilę dołączony do 2. kanału generatora arbitralnego generującego sinusoidę wzorcową. Oscylogram sinusoidy wzorcowej zapisujemy jako przebieg referencyjny. Amplitudę sygnału generatora dobrano tak, aby obie sinusoidy – wzorcowa i wytwarzana w układzie kształtującym – pokryły się ze sobą. Porównanie wizualne wypada nieźle. Widać jednak, że sinusoida układu kształtującego nie osiąga przewidzianej w obliczeniach amplitudy 1,95 V.



Rysunek 12. Wyniki pomiaru rzeczywistego diodowego układu kształtowania sinusoidy

Dokładniejsza ocena jakości przebiegu wymaga pomiaru współczynnika zniekształceń harmonicznych. Jest to możliwe za pomocą narzędzia Spectrum Analyzer zestawu Analog Discovery 2. Otwieramy go i ustawiamy parametry pomiaru: Top=10 dBV, Bottom=–109 dBV, aktywny pomiar Trace 2 – Channel C2, Freq. Range=100 kHz to 122.1 Hz, Start=0 Hz, Stop=100 kHz, Scale=Linear. Uaktywniamy ponadto pomiar Trace2 → Dynamic → THD.

Wynik pomiaru pokazano na **rysunku 13.** Zawartość harmonicznych jest podawana w jednostkach dBc. Do przeliczenia na procenty korzystamy z zależności:

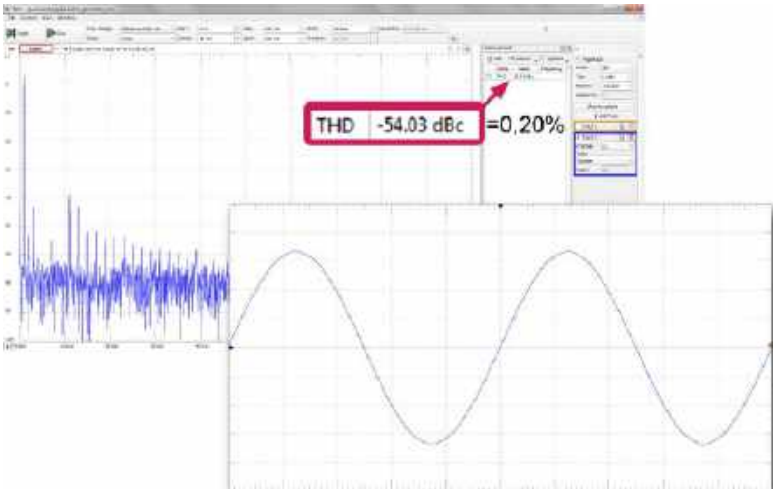
$$THD_{\%} = 10^{\frac{THD_{dBc}}{20}} \cdot 100\%, \text{ czyli } THD = 10^{\frac{-33,68}{20}} = 2,07\%$$

Jest to wynik lepszy niż w symulacji, ale spróbujemy go jeszcze poprawić. W tym celu uruchamiamy analizator w trybie ciągłym tak, aby kręcąc pokrętłami potencjometrów, można było obserwować na bieżąco skutek tego działania. Kręcimy w kierunku, w którym zniekształcenia się zmniejszają. Po przekroczeniu minimum delikatnie wracamy do niego, a następnie tę samą czynność wykonujemy regulując potencjometrem R_2. Niestety, w trakcie korzystania z analizatora widma nie ma możliwości podglądania przebiegu na oscyloskopie Analog Discovery 2. Jeśli chcemy to robić, trzeba skorzystać z jakiegoś zewnętrznego przyrządu. Tą

Rysunek 13. Wyniki pomiaru harmonicznych układu z elementami o wartościach obliczeniowych

eprasa.pl 85168ce91e

metodą udało się osiągnąć zniekształcenia harmoniczne na poziomie ok. 0,2%, a taki wynik należy już uznać za bardzo dobry (**rysunek 14**).



Rysunek 14. Wyniki pomiaru harmonicznych układu z dostrojonymi wartościami elementów

Metoda II

Wrócimy jeszcze do metody generowania przebiegu sinusoidalnego polegającej na filtracji harmonicznych przebiegu prostokątnego. Chociaż należy uznać, że ma ona mało cech praktycznych, to na pewno jest interesująca z dydaktycznego punktu widzenia. W praktyce może być stosowana np. wtedy, gdy wymagany jest jeden przebieg sinusoidalny o określonej i stałej częstotliwości. Wydaje się, że dużo łatwiejsze jest wygenerowanie przebiegu prostokątnego i poddanie go filtracji niż generowanie czystego przebiegu sinusoidalnego dobrej jakości.

Podejście do metody II może być dwojakie. W pierwszym stosujemy filtr selektywny przepuszczający tylko jedną częstotliwość. Filtr jest nastrojony na częstotliwość przebiegu prostokątnego i właśnie taka sinusoida pojawia się na wyjściu. Niedogodnością tej metody jest trudność w zbudowaniu selektywnego filtru przepuszczającego jedną częstotliwość. Popularny mostek typu podwójne T jest filtrem zaporowym. Aby uzyskać filtr przepustowy, konieczne jest umieszczenie go w pętli sprzężenia zwrotnego, a więc dodanie czynnego elementu, który może wnosić własne zniekształcenia harmoniczne. Druga metoda, która wiąże się również z dodaniem filtru aktywnego, polega na zastosowaniu filtru górnozaporowego tłumiącego wszystkie częstotliwości powyżej częstotliwości podstawowej. Aby był on wystarczająco skuteczny, powinien być co najmniej 2. rzędu.

Zobaczmy, jaki wynik uzyskamy z filtrem podwójne T? Aby nie komplikować obliczeń, nie będziemy go stroić do wybranej częstotliwości, tylko zbudujemy z dostępnych w szufladzie elementów i obliczymy, jaka będzie dla nich częstotliwość tłumienia. Schemat układu pokazano na **rysunku 15**, a symulacja jest dostępna w pliku *mostekTT.asc*. Do budowy filtru zastosowano elementy R=2 kΩ i C=100 nF. Częstotliwość środkowa jest więc równa:

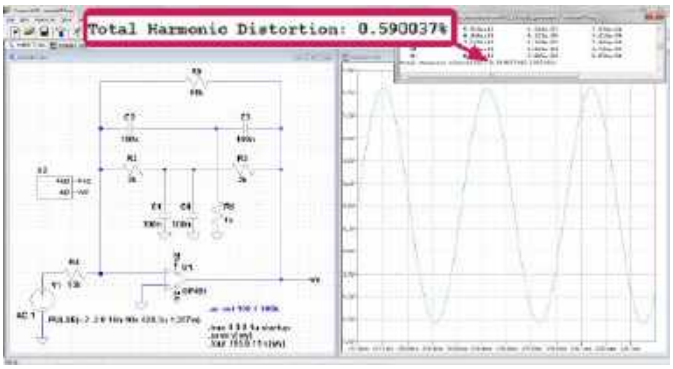
$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 2k \cdot 100n} = 795{,}8\ \text{Hz}$$

Okres i półokres przebiegu prostokątnego o tej częstotliwości są równe odpowiednio: T=1,257 ms i T/2=628,3 μs. Zgodnie z tym źródło sygnału wejściowego zdefiniowano w symulatorze jako:

```
PULSE(-.2 .2 0 10n 10n 628.3u 1.257m)
```

Dla podwyższenia dokładności obliczeń symulacji Transient określono parametr Timestep. Została mu nadana wartość 1 μs. Parametr ten może znacznie wydłużyć czas obliczeń, aby go skrócić do maksimum, zastosowano komendę `SAVE v(wy)`. Powoduje ona tablicowanie wyników tylko z węzła „wy", ale pozostałe węzły nas nie interesują w tej symulacji i można je pominąć.

Należy zauważyć, że mostek TT jest zbocznikowany rezystorem 91 kΩ, który zabezpiecza przed pracą wzmacniacza operacyjnego z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego. Wizualnie przebieg wyjściowy jest bardzo porządny. Obliczona komendą `.four 795.811 v(wy)` zawartość harmonicznych wyniosła 0,59%. Jest to zdecydowanie mniej niż w symulacji diodowego układu kształtującego, ale pamiętamy, że tamten w wersji rzeczywistej udało się podstroić tak, że harmoniczne spadły do 0,2%. Sprawdźmy, jakie parametry będzie miał rzeczywisty układ z filtrem podwójne T.



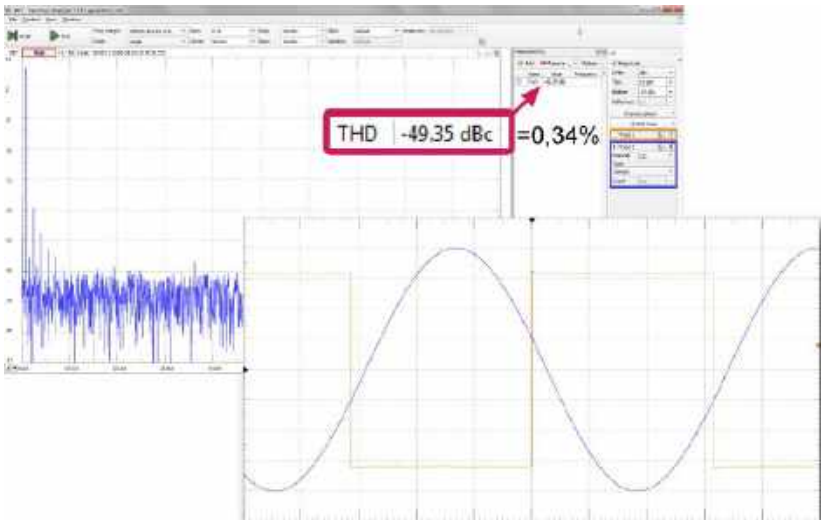
Rysunek 15. Schemat i wyniki symulacji układu z mostkiem TT

Pomiar układu z filtrem TT

Metoda pomiaru jest dokładnie taka sama jak poprzednio. Zmieniamy tylko rodzaj przebiegu wejściowego z piłokształtnego na prostokątny. Pierwsze pomiary wykazały konieczność zmniejszenia amplitudy przebiegu prostokątnego tak, aby nie przesterować wzmacniacza operacyjnego. Do pomiaru harmonicznych, tak jak poprzednio użyliśmy analizatora widma zestawu Analog Discovery 2. Jak się okazało, zniekształcenia harmoniczne uzyskanej sinusoidy są równe –49,35 dBc, czyli 0,34% (**rysunek 16**), a więc lepiej niż w symulacji, ale gorzej niż z układem kształtowania sinusoidy. Jest to wynik trochę zaskakujący. Należy sądzić, że decyduje o tym zastosowany w filtrze wzmacniacz operacyjny.

W artykule znalazło się miejsce na omówienie dwóch metod generowania przebiegu sinusoidalnego, co oczywiście nie wyczerpało tematu. Może powrócimy do niego w następnym odcinku.

Jarosław Doliński, EP



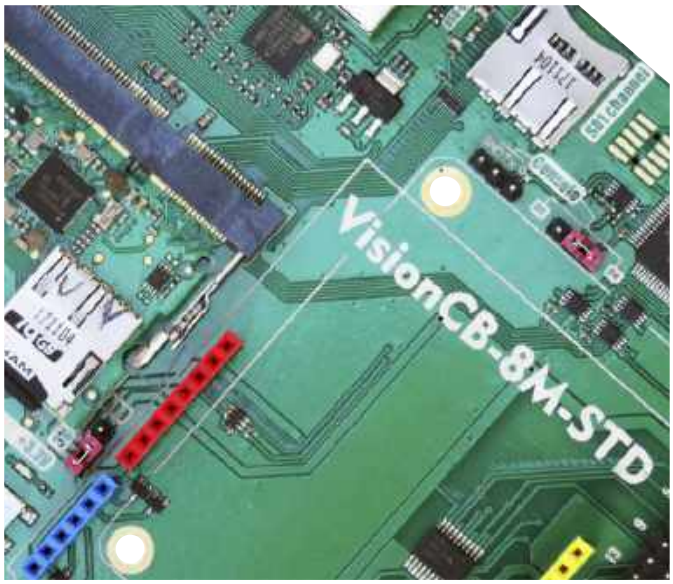
Rysunek 16. Wyniki pomiaru rzeczywistego układu z mostkiem TT

eprasa.pl 85168ce91e

VisionSOM-8Mmini

– multimedialny system embedded firmy SoMLabs

Oferta produkcyjna firmy SoMLabs konsekwentnie się poszerza, w tym roku polski producent komputerów embedded wprowadził do produkcji dwa moduły SoM z wielordzeniowymi, heterogenicznymi mikroprocesorami STM32MP15x (STMicroelectronics) i i.MX8Mmini (NXP). W artykule zaprezentujemy cechy i możliwości modułu VisionSOM-8Mmini, który jest obecnie jednym z najnowocześniejszych na rynku. Producent zastosował w prezentowanym module nie tylko szybką i energooszczędną pamięć LPDDR4, ale także wyspecjalizowany układ PMIC, który zapewnia długą żywotność jednostki centralnej.



W ostatnich dniach sierpnia firma SoMLabs wprowadziła do sprzedaży kolejny w swojej ofercie moduł SoM (*System-on-Module*) o nazwie VisionSOM-8Mmini. **Fotografia 1** pokazuje wygląd modułu w wersji z pamięcią Flash eMMC. Jest to nowoczesny komputer multimedialny z mikroprocesorem i.MX8Mmini, bogato wyposażony w peryferia: energooszczędną pamięć LPDDR4 o pojemności do 4 GB i 32-bitowej magistrali danych, pamięć Flash eMMC o pojemności do 32 GB i opcjonalny moduł komunikacji bezprzewodowej Wi-Fi/BLE5.2. Podobnie do pozostałych SOM-ów z rodziny VisionSOM, także prezentowany w artykule VisionSOM-8Mmini wyposażono w moduł radiowy firmy Murata, którego jedną z zalet jest udokumentowana precertyfikacja RED. Producent modułu VisionSOM-8Mmini przewidział możliwość zastąpienia lutowanej pamięci eMMC kartą MicroSD, na **fotografii 2** pokazano wygląd takiej wersji SOM-a. Schemat blokowy modułu pokazano na **rysunku 1**.

Fotografia 1. Wygląd modułu VisionSOM-8Mmini z pamięcią Flash eMMC

Fotografia 2. Wygląd modułu VisionSOM-8Mmini z pamięcią Flash w postaci karty MicroSD

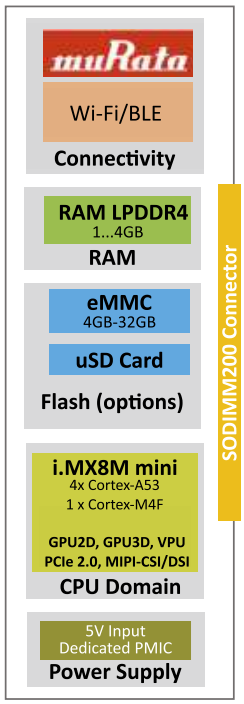
Więcej informacji:
Dystrybutorem firmy SoMLabs w Polsce jest firma Elhurt Sp. z o. o., http://som.elhurt.com.pl, bezpośredni kontakt: Andrzej Moczulski, tel. 600082430, som@elhurt.com.pl.

Komputer VisionSOM-8Mmini ma format mechaniczny zgodny z wcześniej produkowanymi przez SoMLabs modułami VisionSOM – znany z komputerów przenośnych – popularny SODIMM200. Jest to rozwiązanie o wysokiej odporności mechanicznej i dużej trwałości styków, odporne na typowe warunki środowiskowe spotykane w aplikacjach urządzeń embedded.

Zastosowany w modułach VisionSOM-8Mmini mikroprocesor z rodziny i.MX8Mmini (jego schemat blokowy pokazano na **rysunku 2**) ma budowę heterogeniczną i jest wyposażony w cztery rdzenie Cortex-A53 (o maksymalnej częstotliwości taktowania do 1,8 GHz) oraz jeden rdzeń „mikrokontrolerowy" – Cortex-M4F (o częstotliwości taktowania do 400 MHz).

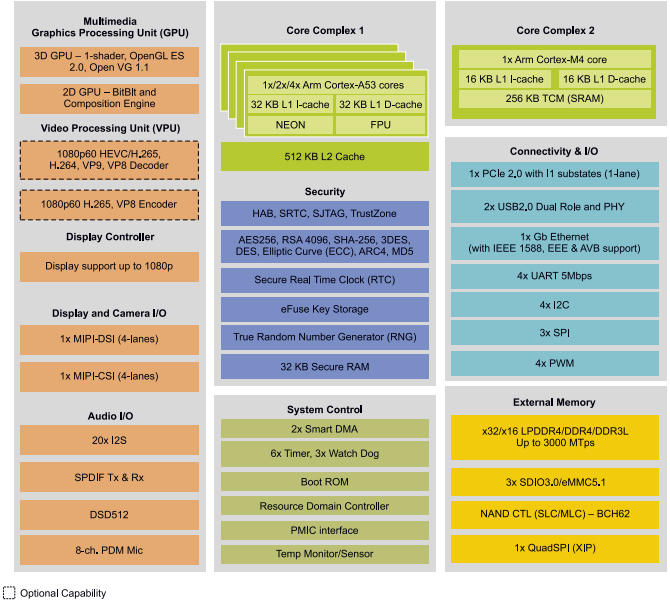
Mikroprocesor zastosowany w VisionSOM-8Mmini wyposażono w dużą liczbę

Atut #1: wydajne GPU
Mikroprocesor użyty w module VisionSOM-8Mmini wyposażono w zaawansowany koprocesor graficzny 3D firmy Vivante – GC NanoUltra. Jest on zgodny z OpenGL ES 2.0, OpenGL 2.x Desktop oraz OpenVG 1.1, obsługuje grafiki FullHD.



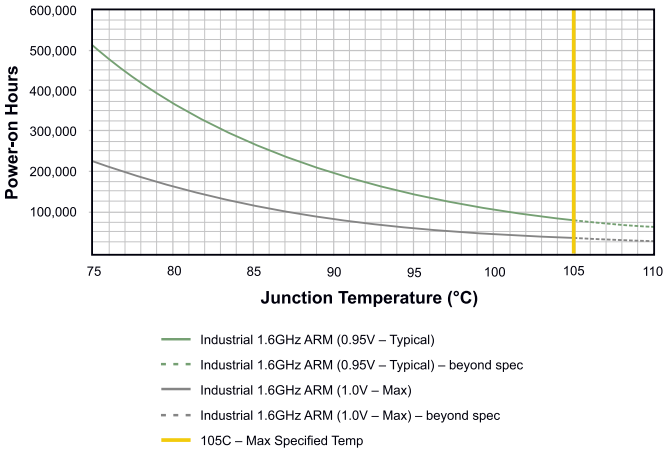
Rysunek 1. Schemat blokowy modułu VisionSOM-8Mmini

eprasa.pl 85168ce91e

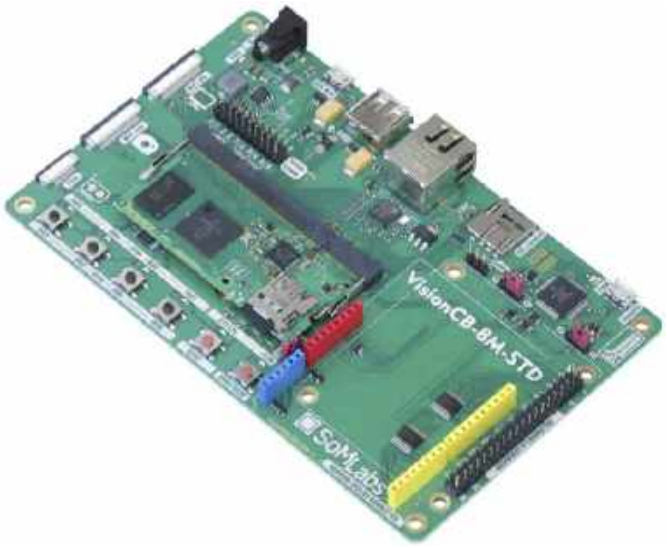


Rysunek 2. Schemat blokowy mikroprocesora i.MX8Mmini

Atut #2: zintegrowany VPU
Mikroprocesor użyty w module VisionSOM-8Mmini wyposażono w sprzętowy kodek wideo VPU (*Video Processing Unit*), który wspomaga realizację kodowania i dekodowania m.in. standardów: 1080p60 VP9 Profile 0, 2 (10-bit) decoder, HEVC/H.265 decoder, AVC/H.264 Baseline, Main, High decoder, VP8 decoder oraz 1080p60 AVC/H.264 encoder, VP8 encoder.



Rysunek 3. Charakterystyka żywotności przemysłowej wersji mikroprocesora i.MX8Mmini w zależności od wartości napięcia zasilającego rdzeń i temperatury złącza



Fotografia 3. Płytka bazowa VisionCB-8M-STD została wyposażona m.in. w licencjonowany interfejs J-Link firmy Segger – na zdjęciu z zainstalowanym VisionSOM-8Mmini z pamięcią Flash w postaci karty MicroSD

(i oczywiście modułu VisionSOM-8Mmini), w jego skład wchodzą m.in.:

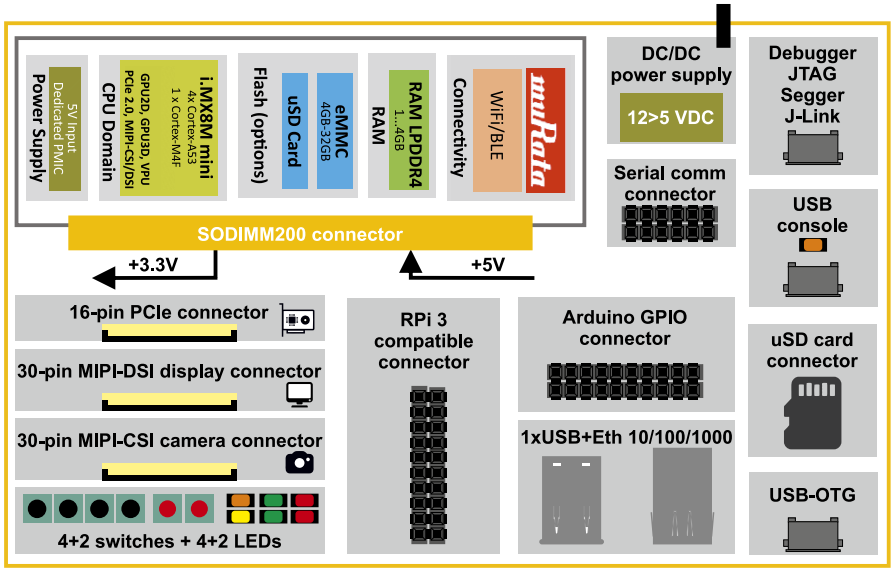
- interfejs PCIe, za pomocą którego można dołączyć do mikroprocesora m.in. dyski SSD;
- gigabitowy interfejs Ethernet;
- dwa kanały (z warstwą fizyczną) USB2.0;
- ponadto: 4×UART (do 5 Mb/s), 4×I²C (FastMode), 3×SPI itp.

Pomimo bogatego wyposażenia pobór mocy przez moduł VisionSOM-8Mmini jest niewielki, co wynika z zaawansowanej technologii użytej do produkcji mikroprocesorów o wymiarze charakterystycznym 14 nm oraz zastosowania zaawansowanych pamięci zoptymalizowanych do stosowania w urządzeniach przenośnych LPDDR4. Optymalizację poboru mocy i długą trwałość mikroprocesora zapewnia zastosowany w module VisionSOM-8Mmini wyspecjalizowany układ zasilający (PMIC) firmy NXP, który gwarantuje – zgodnie z notą aplikacyjną AN12468 firmy NXP – czas bezawaryjnej, ciągłej

modułów i interfejsów. Szczególnie interesujący jest podsystem multimedialny, w skład którego wchodzą m.in.:

- GPU – koprocesor graficzny 3D Vivante GC NanoUltra/2D Vivante GC320, kompatybilny z OpenGL ES 2.0 obsługujących wyświetlacze Full HD (1920×1080 px);
- VPU – sprzętowy kodek wideo (1080p60 VP9 Profile 0, 2 (10-bit) decoder, HEVC/H.265 decoder, AVC/H.264 Baseline/Main/High decoder, VP8 decoder, 1080p60 AVC/H.264 encoder, VP8 encoder);
- SAI – 5-kanałowy interfejs cyfrowego audio zintegrowany z interfejsami PDM;
- interfejsy MIPI kontrolera kamery wideo (CSI) oraz wyświetlacza (DSI).

Interesujące jest także wyposażenie komunikacyjne prezentowanego mikroprocesora



Rysunek 4. Schemat blokowy płytki bazowej VisionCB-8M-STD

eprasa.pl 85168ce91e

Atut #3: heterogeniczna architektura
Mikroprocesor użyty w module VisionSOM-8Mmini ma heterogeniczną architekturę, w skład której wchodzą 4 rdzenie aplikacyjne Cortex-A53 oraz jeden rdzeń real-time – Cortex-M4F.

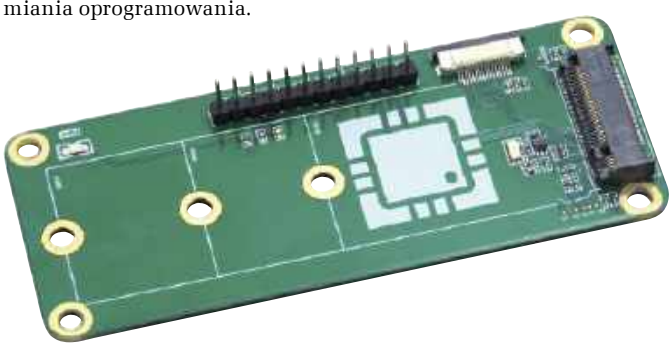
Fotografia 4. Wygląd konwertera MIPI-DSI na HDMI/LVDS firmy SoMLabs

pracy MPU od 500000 h do 82000 h (**rysunek 3**), w zależności od temperatury złącza.

Z myślą o konstruktorach potrzebujących taniego narzędzia sprzętowego do ewaluacji możliwości VisionSOM-8Mmini firma SoMLabs opracowała i oferuje płytkę bazową (*carrier board*) o nazwie VisionCB-8M-STD (**fotografia 3**), którą wyposażono we wszystkie podstawowe peryferia oraz złącza, w tym m.in.:

- dla shieldów, zgodne z Arduino UNO;
- dla hatów, zgodne z Rpi;
- złącze ekspandera PCIe;
- złącze MIPI-DSI (do wyświetlacza z touch panelem);
- złącze MIPI-CSI (do kamery HD).

Na **rysunku 4** pokazano schemat blokowy płytki VisionCB-8M-STD. Warto zwrócić uwagę, że jej standardowym wyposażeniem jest także licencjonowana wersja programatora-debuggera J-Link firmy Segger, który można wykorzystać do diagnostyki systemu i uruchamiania oprogramowania.



Fotografia 5. Adapter ze złączem M.2 dla dysków SSD dołączanych do interfejsu PCIe

Firma SoMLabs, z myślą o użytkownikach prezentowanego zestawu, oferuje dwa ekspandery funkcjonalne, które pozwalają na użycie w aplikacjach:

- wyświetlaczy z interfejsami HDMI lub LVDS – dzięki konwerterowi MIPI-DSI<>HDMI/LVDS o nazwie SL-MIPI-LVDS-HDMI-CNV (**fotografia 4**), dołączanemu do złącza MIPI-DSI na płytce bazowej;
- dysków SSD i innych modułów w formacie M.2 z kluczem E o wymiarze do 2280 – dzięki adapterowi SL-M2-SSD-ADP (**fotografia 5**), dołączanemu do złącza PCIe na płytce bazowej.

W najbliższym czasie zapowiadany jest kolejny moduł ekspandera funkcjonalnego z kamerą wideo HD, wyposażoną w interfejs MIPI-CSI.

Piotr Zbysiński, SoMLabs

REKLAMA

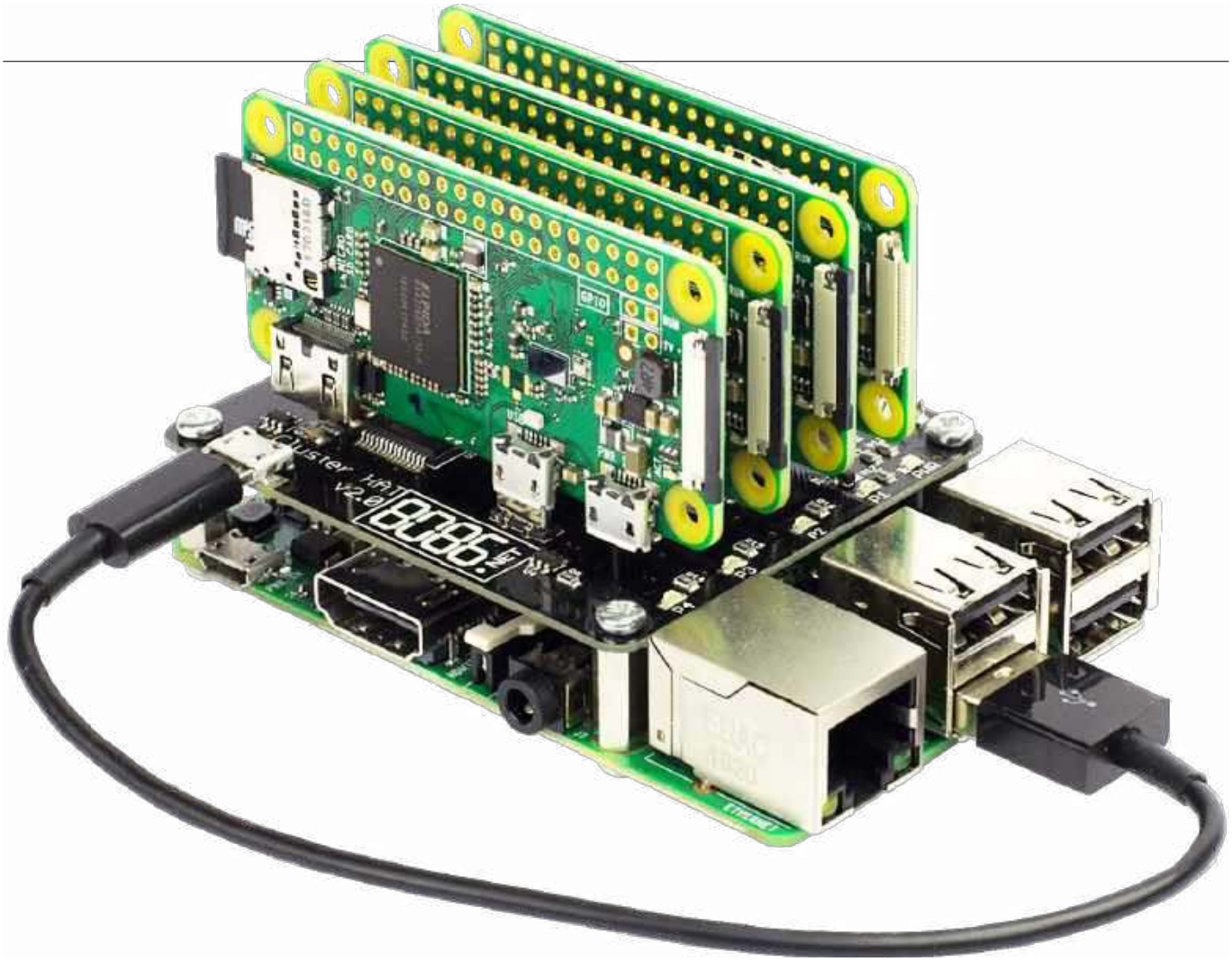
elhurt

30 lat w branży elektronicznej

som.elhurt.com.pl
komunikacja.elhurt.com.pl
zasilacze.elhurt.com.pl
mornsun.elhurt.com.pl
ibase-pl.eu
prttech-pl.eu

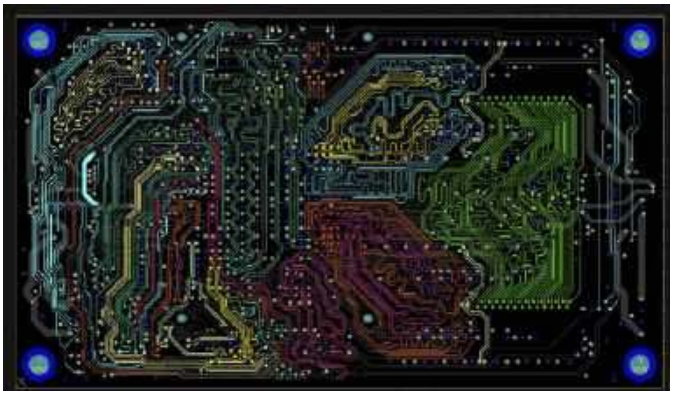
www.elhurt.com.pl

eprasa.pl 85168ce91e



Komputery jednopłytkowe

Projektując układy elektroniczne, konstruktorzy często decydują się na wykorzystanie mikrokontrolerów jednoukładowych z uwagi na ich niską cenę, prostotę użycia (która wiąże się z brakiem konieczności prowadzenia skomplikowanych ścieżek, związanych z interfejsami pamięci) oraz stosunkowo dużą moc obliczeniową współczesnych mikrokontrolerów. W bardziej skomplikowanych projektach moc obliczeniowa takiego układu nie jest wystarczająca. Projektant musiał sięgnąć po inne rozwiązania. Pierwszą myślą, jaka nasuwa się w tym przypadku, jest zastąpienie mikrokontrolera jednoukładowego bardziej zaawansowanym systemem mikroprocesorowym.



Fotografia 1. Schemat płytki PCB z interfejsem DDR dla układu SOC

Własna implementacja zaawansowanego rozwiązania, nawet z wykorzystaniem układu SOC, wiąże się z koniecznością użycia wielowarstwowej płytki PCB i przymusem prowadzenia ścieżek do układów pamięci zgodnie ze sztuką projektowania obwodów wysokich częstotliwości. Zadanie staje się skomplikowane i często nieopłacalne przy niskim nakładzie produkcyjnym. Na **fotografii 1** pokazano przykładowy widok płytki PCB, ilustrujący połączenie pamięci DDR z układem SOC. Jak łatwo możemy zauważyć, przygotowanie takiej płytki wymaga dużego doświadczenia od projektanta oraz jest czasochłonne.

Problem został szybko dostrzeżony przez producentów układów elektronicznych i w ten sposób zaczęły powstawać komputery jednopłytkowe (***SBC*** – *Single Board Computer*), integrujące procesor, pamięci oraz

eprasa.pl 85168ce91e

Fotografia 2. Dyna-micro – protoplasta komputera SBC

układy interfejsowe na jednym kawałku PCB. Jeżeli chcemy zastosować skomplikowany system mikroprocesorowy, wystarczy, że skorzystamy z gotowego komputera SBC oraz zaprojektujemy układ interfejsu, łączący komputer z układami zewnętrznymi. Dzięki temu przy produkcji niskonakładowej znacząco zmniejszamy koszt projektu, ponieważ wystarczy zaprojektować układ interfejsu specyficznego dla danego produktu, który najczęściej realizowany jest w postaci nieskomplikowanego układu – prostej dwuwarstwowej płytki drukowanej. Dla produkcji wysokonakładowej warto rozważyć zaprojektowanie całego systemu mikroprocesorowego we własnym zakresie, ponieważ wysokie koszty projektu zostaną rozłożone na dużą liczbę urządzeń, a producent komputerów SBC także musi zarobić na swoim produkcie. Istotną zaletą tego rozwiązania będą mniejsze wymiary urządzenia, ponieważ z układu SOC będziemy wyprowadzać tylko te sygnały, które będą potrzebne w projekcie, bez konieczności wpasowywania się w interfejs komputera SBC, przewidziany przez producenta.

Historia komputerów jednopłytkowych

Za pierwszy komputer jednopłytkowy uważa się urządzenie o nazwie „dyna-micro" powstały w 1976 roku (**fotografia 2**). Został zbudowany na bazie mikroprocesora i8080 i zawierał wszystkie elementy typowe dla tego rodzaju urządzeń, czyli pamięć EPROM oraz RAM, układy wejścia-wyjścia, prostą klawiaturę oraz wyświetlacz. Do programowania nie były potrzebne żadne specjalistyczne narzędzia ani dodatkowy zewnętrzny komputer, ponieważ kod maszynowy można było wprowadzać bezpośrednio z klawiatury. W analogicznym okresie powstała podobna konstrukcja o nazwie KIM1, bazująca na popularnym w tym czasie mikroprocesorze 6502.

Do połowy lat 90-tych, we wczesnej fazie rozwoju, gdy architektura ARM była jeszcze w powijakach, zdecydowaną większość komputerów jednopłytkowych stanowiły platformy oparte na mikroprocesorach zgodnych z x86, z uwagi na najwyższą wydajność. Komputery SBC tego typu są zgodne z architekturą IBM-PC, a to, co je wyróżnia, w porównaniu do klasycznych płyt głównych PCAT/ATX, to zdecydowanie mniejsze wymiary, dodatkowe porty IO oraz często brak możliwości zastosowania kart rozszerzeń. Procesor oraz pamięć są przeważnie zintegrowane z płytą główną, aby zwiększyć odporność na wstrząsy oraz zmniejszyć wymiary. Około roku 2000 na popularności zaczęła zyskiwać architektura ARM, która przebojem zdobywała rynek mikrokontrolerów jednoukładowych oraz rozwiązań bazujących na układach SOC. Przełomem było pojawienie się rdzeni **CortexM** oraz układów serii **CortexA** dla procesorów aplikacyjnych. Moc obliczeniowa procesorów aplikacyjnych z 64-bitowym rdzeniem Cortex A53/A76/A78 jest porównywalna z mikroprocesorami Intel Core i3/5/7, przy znacząco mniejszym poborze prądu oraz prostszej architekturze, pozbawionej wielu naleciałości historycznych. O sukcesie oraz wydajności architektury ARM może świadczyć fakt, iż firma Apple w tym roku postanowiła zrezygnować

Fotografia 3. Komputer jednopłytkowy w standardzie PC/104, PC/104 Plus

z procesorów Intela w swoich komputerach na rzecz własnych autorskich procesorów bazujących na architekturze ARM. Wraz z pojawieniem się rdzeni **CortexA,** na rynku zaczęły się pojawiać komputery jednopłytkowe z układami ARM, w dużej części wypierając droższe i bardziej energochłonne rozwiązania x86. Komputery oparte na architekturze x86 w większości przypadków pozostały w użyciu tylko tam, gdzie jest potrzebna zgodność z architekturą PC, np. aplikacje dla systemu Windows.

Komputery SBC zgodne z x86

Komputery SBC, zgodne z x86, stanowią zminiaturyzowane wersje płyt głównych komputerów PC, co jest ich głównym atutem. W przeciwieństwie do komputerów z układami ARM, są one ustandaryzowane, zaczynając od oprogramowania, poprzez wymiary, na zestawie złączy kończąc. Istotny jest również fakt, iż często, jeśli mają jakieś wymienne moduły, możemy zastosować standardowe komponenty od laptopów czy komputerów PC, np. układy pamięci czy karty rozszerzeń, co znacząco zwiększa możliwości rozbudowy oraz obniża koszty. Dodatkowo do dyspozycji otrzymujemy zestaw zaawansowanych magistral, takich jak **PCIE, SATA, USB 3.1** itp., które w płytkach opartych na architekturze ARM nie zawsze są standardem. Często komputery mają ustandaryzowane wymiary oraz są ze sobą zgodne programowo, zatem w teorii możemy wymiennie stosować płytki różnych producentów.

Do najpopularniejszych standardów komputerów jednopłytkowych należą:

Fotografia 4. Komputer jednopłytkowy w standardzie EPIC Express

eprasa.pl 85168ce91e

- **PC/104, PC/104 Plus** – jeden z najpopularniejszych standardów powstały w 1997 roku (**fotografia 3**);
- **EPIC Express** – mający swój początek w 2004 roku. Standardowy rozmiar modułu wynosi 165×114 mm. Umożliwia wykorzystanie kart rozszerzeń formatu PC/104, a dzięki stosunkowo dużym rozmiarom może zawierać wiele złączy znanych z komputerów PC (**fotografia 4**);
- **Nano-ITX** – zaprezentowany przez firmę VIA Technologies w 2003 roku. Ma wymiary 120×120 mm. Nie jest to standard stricte do systemów wbudowanych, a raczej do urządzeń typu STB, DVR, kiosków info itp., jednak, jeśli nie potrzebujemy dodatkowych kart rozszerzeń, może być również wykorzystany do systemów wbudowanych (**fotografia 5**);
- **ESM Express** – standard opracowany przez konsorcjum VITA dla systemów wbudowanych o wymiarach 95×125 mm (**fotografia 6**);
- **XTX** – standard promowany przez firmę Advantech o wymiarach 95×114 mm. Definiuje on również standardowy zestaw złączy: 4 linie PCIE, złącze Ethernet, 2 złącza IDE, 4 złącza SATA, 6 interfejsów USB oraz złącze audio. Napięcie zasilania płyty wynosi 5 V (**fotografia 7**);
- **ETX** – jeden ze standardów promowanych przez firmę Kontron, o wymiarach 95×114 mm (**fotografia 8**);
- **NUC** – jest to standard firmy Intel powstały w 2013 roku. Nie jest on stricte przeznaczony do systemów wbudowanych, a raczej do miniaturowych komputerów, jednak, jeśli nie potrzebujemy korzystać z dedykowanych kart rozszerzeń, może być również wykorzystywany we własnych konstrukcjach. Standard ten definiuje rozmiary płytki na 101×101 mm, jednak niektóre z modułów mogą mieć inne wymiary (**fotografia 9**).

Najpowszechniej wykorzystywanym standardem wśród komputerów jednopłytkowych jest PC/104. Standard ten, poza samym rozmiarem, definiuje zestaw złączy, które płyta z nim zgodna powinna mieć. Został opracowany przez firmę AMPRO, a później stał się częścią standardu IEEE, dzięki czemu płyty w tym formacie mogą być produkowane przez różne firmy. Główną zaletą rozwiązania jest możliwość stosowania dodatkowych kart rozszerzeń poprzez nakładanie jednej płytki na drugą – w formie kanapki. Z uwagi, iż jest to najbardziej rozpowszechniony standard na rynku, istnieje wiele kart rozszerzających różnych producentów. Wraz z rozwojem komputerów PC i zmianą magistral, standard ewaluował i występuje w następujących odmianach:

- **PC/104** – pierwsza wersja z roku 1992. Zawiera zestaw sygnałów zgodnych ze standardem ISA. W zależności od rodzaju do dyspozycji możemy mieć magistralę ISA 8- lub 16-bitową (na dodatkowych 40 kontaktach);
- **PC/104-Plus** – kolejna wersja rozwojowa, gdzie poza złączem ISA dołożono dodatkowe złącze magistrali PCI. Do układów tego typu możemy zarówno dołączać starsze rozszerzenia ISA, jak i nowsze PCI;
- **PCI-104** – wersja standardu z roku 2003, w której usunięto magistralę ISA, pozostawiając jedynie PCI oraz zmieniając złącze na 120-to kontaktowe, kompatybilne z wersją PC/104Plus. Z uwagi na usunięcie magistrali ISA, nie jest on kompatybilny z PC/104;
- **PCI-104/Express** – najnowsza wersja standardu z 2008 roku, gdzie do magistrali PCI, w miejscu dawnego złącza ISA, wstawiono złącze magistrali **PCIE**. Standard definiuje dodatkowe 156-pinowe złącze, przeznaczone dla tych sygnałów. Poza samym **PCIE,** wyprowadzono dodatkowo magistrale: **USB, SATA oraz LPC.** Zaznaczam, że złącze dodatkowe może występować w dwóch odmianach: typ 1 oferuje **PCIe x1,** dwa porty USB oraz **PCIe x16**; typ 2 ma dodatkowo dwa porty USB 3.0, port SATA oraz LPC;
- **PCIe/104** – jest to wersja standardu, która została pozbawiona przestarzałego złącza **PCI, a złącze PCIE** pozostało na tym samym miejscu. Z uwagi na brak złącza **PCI** jest ono niekompatybilne z rozszerzeniami przeznaczonymi dla płytek **PCI104/Express.**

Fotografia 5. Komputer jednopłytkowy w standardzie Nano-ITX

Fotografia 6. Komputer jednopłytkowy w standardzie ESM Express

Fotografia 7. Komputer jednopłytkowy w standardzie XTX

Wracając do oprogramowania, większość płyt x86 jest kompatybilna z oprogramowaniem dla komputerów PC, bez konieczności dokonywania modyfikacji. Zarówno system Windows, jak i Linux obsłużone będą bez problemu, z wykorzystaniem standardowych sterowników dla portów szeregowych, złączy Ethernet, USB czy kart graficznych. Oprogramowanie może być napisane przy użyciu standardowych narzędzi deweloperskich przeznaczonych dla PC. Nie

eprasa.pl 85168ce91e

potrzeba żadnych specyficznych narzędzi, a oprogramowanie, jeśli będzie działać na PC, to również zadziała na modułach PC. Jedynym problemem mogą być złącza wejścia-wyjścia, które nie są ustandaryzowane w architekturze PC, ale producenci najczęściej dostarczają stosowne sterowniki dla najpopularniejszych systemów operacyjnych. Często płyty tego typu mają zintegrowaną pamięć FLASH w postaci wlutowanego niewielkiego dysku SSD, na którym może być przechowane oprogramowanie. Nowsze wersje standardu pozwalają dołączyć

Fotografia 8. Komputer jednopłytkowy w standardzie ETX

Fotografia 9. Komputer jednopłytkowy w standardzie NUC

Tabela 1. Rozwiązania firmy AMD

Nazwa	Wątki	Częstotliwość	TDP	Grafika
V1807B	4/8	3,35 GHz	35-54 W	Vega 11
V1756B	4/8	3,25 GHz	35-54 W	Vega 8
V1605B	4/8	2,0 GHz	12-25 W	Vega 8
V1404I	4/8	2,0 GHz	12-25 W	Vega 8
V1202B	2/4	2,3 GHz	12-25 W	Vega 3
V1780B	4/8	3,35 GHz	35-54 W	
R1606G	2/4	2,6 GHz	12-25 W	Vega 3
R1505G	2/4	2,4 GHz	12-25 W	Vega 3
R1305G	2/4	1,5 GHz	8-10 W	Vega 3
R1102G	2/2	1,2 GHz	6 W	Vega 3

zewnętrzny dysk za pomocą złącza SATA. Należy wspomnieć, że istnieją również płyty w formacie PC/104, oparte na architekturze **ARM czy PowerPC,** jednak są one stosunkowo rzadko spotykane.

Jeśli chodzi o procesory, to podobnie jak dla komputerów PC, dostarczane są zasadniczo przez dwie firmy: Intel oraz AMD. Najbardziej wydajne komputery jednopłytkowe korzystają z klasycznych procesorów, przeznaczonych dla laptopów oraz desktopów. Wymagają one użycia dodatkowych układów zewnętrznych, co zwiększa koszty rozwiązania. Obie firmy produkują układy x86, przeznaczone dla urządzeń wbudowanych, które de facto są układami SOC, wymagającymi jedynie dołączenia układów pamięci FLASH oraz RAM. Firma AMD produkuje procesory o nazwie „Ryzen Embedded", które zastąpiły procesory „AMD Geode", natomiast Intel do zastosowań tego typu rekomenduje procesory Intel Celeron serii G oraz niektóre procesory Intel Atom serii Z. **Tabela 1** pokazuje rozwiązania firmy AMD.

Procesory przeznaczone dla systemów wbudowanych, skonstruowane są w oparciu na nowoczesnej architekturze Zen, w technologii 14 nm. Do dyspozycji mamy linię wysokowydajną serii V oraz linię ekonomiczną serii r. Seria wysokowydajna zawiera zintegrowane karty graficzne, zaczynając od Vega 3, na Vega 11 kończąc, o wydajności do 3,6 TFLOPS. Układy **Ryzen** charakteryzują się mocą TDP na poziomie 35…54 W. Nie bez znaczenia jest również bogate wyposażenie dodatkowe: sprzętowy enkoder i dekoder wideo H264/H265 o maksymalnej rozdzielczości 4 k, karta graficzna wspierająca obsługę dwóch monitorów czy dwie karty sieciowe o przepustowości 1 Gbps. Linia ekonomiczna jest również kompletnym układem SOC o mniejszej wydajności, charakteryzująca się mniejszym poborem prądu w przedziale 6…25 W.

Listę procesorów firmy Intel rekomendowanych dla systemów wbudowanych pokazuje **tabela 2.** Do systemów wbudowanych zalecane są obecnie procesory serii Celeron G oraz Atom Z. Większa część z tych układów ma zintegrowaną kartę graficzną serii „Intel Graphics". Analogicznie do układów firmy AMD, w zależności od wydajności, układy charakteryzuje się mocą TDP od kilku do kilkudziesięciu watów. Dysponują stosunkowo dużą mocą obliczeniową.

Na rynku istnieje wielu producentów komputerów jednopłytkowych, zgodnych z architekturą x86. Prym wiodą głownie firmy: AAEON, Kontron, Advantech, ELMA, JHCTEC. Ciekawie przedstawia się oferta firmy AAEON, która specjalizuje się głównie w komputerach jednopłytkowych w formacie 3,5" o handlowej nazwie GENE. Do dyspozycji mamy komputery SBC, od najtańszych, bazujących na procesorach serii Atom, poprzez bardziej wydajne, oparte na układach SOC serii Celeron G oraz J, skończywszy na najmocniejszych układach serii i3/i5/i7, znanych z laptopów. Jeden z najtańszych komputerów tego typu to płytka **UPCCHT01A200116A11,** zbudowana na bazie procesora Atom Z8350, mająca 1 GB pamięci RAM oraz 16 GB pamięci FLASH.

Komputer charakteryzuje się wymiarami 56×66 mm, zasilaniem 5 V oraz wyposażony jest w najważniejsze interfejsy komunikacyjne, takie jak: Bluetooth, Wi-Fi, Ethernet. Dodatkowo do dyspozycji mamy złącza HDMI, eDP, MIPI, I^2S oraz porty USB 2.0/3.0. Jego cena utrzymuje się około 400 zł. Należy liczyć się z tym, że moc obliczeniowa układu może być mniejsza niż niektórych komputerów SBC, wyposażonych w układy ARM, zwłaszcza serii A73.

Jeśli potrzebujemy większej wydajności, można skorzystać z płytek wyposażonych w układy Celeron, np. komputer **UPSAPLC2A200432** (**fotografia 10**), którego sercem jest procesor Intel Celeron N3550. Komputer ma 4 GB pamięci RAM DDR4, 32 GB pamięci FLASH oraz dodatkowo wyposażony jest w sprzętowy układ kodowania wideo H264, HVEC4, VP8.

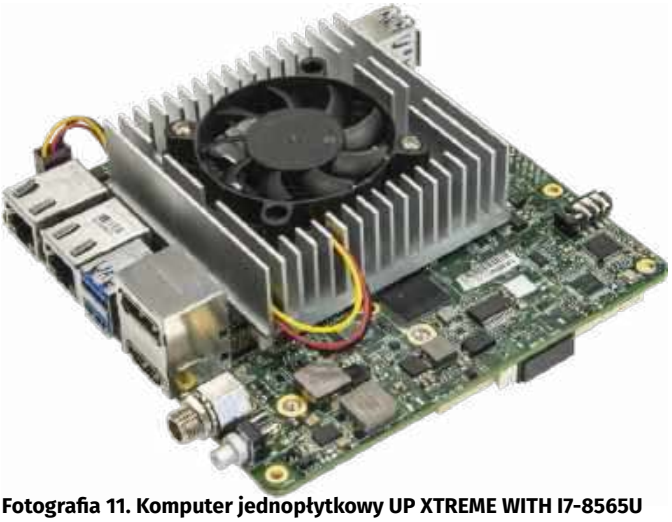
Zawiera również bardziej rozbudowaną listę interfejsów, gdzie do dyspozycji jest 40-pinowe złącze GPIO, podwójny interfejs Ethernet, złącze eDP/MIPI, złącze mPCI-E oraz SATA. Daje to duże możliwości rozbudowy, ponieważ mamy możliwość dołączenia dysku SATA czy kart rozszerzeń od laptopów. Niestety cena tego rozwiązania jest

eprasa.pl 85168ce91e

Tabela 2. Lista procesorów firmy Intel rekomendowana dla systemów wbudowanych

Processor number	Family	Tech. (micron)	CPU speed (GHz)	Bus speed (MHz)	L2 cache size (KB)	L3 cache size (MB)	Cores	EM64T	HT	VT	XD	SS	Notes
725C	Mobile Celeron Dual-Core	0.032	1.3		256	1.5	1	+	+	+	+	+	Ultra low voltage
1403 v2	Pentium Dual-Core	0.022	2.6		512	6	2	+	-	+	+	+	
1405 v2	Pentium Dual-Core	0.022	1.4		512	6	2	+	-	+	+	+	
4305UE	Mobile Celeron Dual-Core	0.014	2		512	2	2	+	-	+	+	+	
A3930	Atom x5	0.014	1.3		2048		2	+	-	+	+	+	
A3940	Atom x5	0.014	1.6		2048		4	+	-	+	+	+	
A3950	Atom x7	0.014	1.6		2048		4	+	-	+	+	+	
A3960	Atom x7	0.014	1.9		2048		4	+	-	+	+	+	
B915C	Pentium Dual--Core Mobile	0.032	1.5		512	3	2	+	+	+	+	+	Ultra low voltage
B925C	Pentium Dual--Core Mobile	0.022	2		512	4	2	+	+	+	+	+	Ultra low voltage
C2308	Atom	0.022	1.25		1024		2	+	-	+	+		
C2316	Atom	0.022	1.5		1024		2	+	-	+	+		
C2338	Atom	0.022	1.7		1024		2	+	-	+	+	+	
C2358	Atom	0.022	1.7		1024		2	+	-	+	+	+	
C2508	Atom	0.022	1.25		2048		4	+	-	+	+		

Fotografia 10. Komputer jednopłytkowy UPSAPLC2A200432



Fotografia 11. Komputer jednopłytkowy UP XTREME WITH I7-8565U

ponaddwukrotnie większa niż w przypadku poprzednio omówionego komputera.

Jeśli potrzebujemy najwyższej wydajności, możemy zastosować, bardzo podobny do poprzedniego, komputer jednopłytkowy o oznaczeniu **UP XTREME WITH I78565U** (**fotografia 11**). Sercem komputera jest znany z laptopów układ Intel Core i78565U charakteryzujący się zbliżoną do laptopów wydajnością i mocą TDP na poziomie 15 W. Do dyspozycji oddano 16 GB pamięci RAM DDR4 oraz 64 GB pamięci FLASH. Zestaw interfejsów komunikacyjnych jest bardzo podobny jak w poprzednim komputerze, dodano jedynie złącze **M2** oraz interfejs **DisplayPort**. Jak łatwo zauważyć, ostatnia propozycja ma parametry podobne do najbardziej wydajnych laptopów, co również okupione jest wysoką ceną, która wynosi ponad 3000 zł.

Innym bardzo popularnym producentem komputerów SBC jest firma Kontron, mająca w ofercie zarówno rozwiązania z procesorami firmy **Intel**, jak i **AMD**. Układy **Intela** mają bardzo podobne możliwości do poprzednio omówionych produktów, dlatego skupimy się na rozwiązaniach z układami firmy **AMD**. W ofercie pojawił się bardzo ciekawy komputer o oznaczeniu **3.5"-SBC-VR1000** (**fotografia 12**), który zawiera procesory Ryzen Embedded serii V1000/R1000. Dzięki zastosowaniu układu otrzymujemy wydajny procesor graficzny oraz sprzętowe wsparcie dla kodowania i dekodowania wideo w rozdzielczości 4 k.

Płyta ma budowę modułową, a zatem w gestii użytkownika leży stosowne wyposażenie komputera w moduły pamięci SODIMM DDR czy pamięć nieulotną FLASH w postaci dysku SSD M.2. Poza kosztem zakupu płyty musimy zatem ponieść dodatkowe wydatki związane z zakupem pamięci czy dysku. Schemat blokowy komputera pokazano na **rysunku 1.** Do dyspozycji mamy bogaty zestaw złączy, począwszy od portów szeregowych czy USB 3.0, poprzez złącze HDMI, skończywszy na podwójnym złączu Ethernet. Jest to bardzo ciekawa i tańsza alternatywa, zarówno dla procesorów Intel, jak i niektórych komputerów z procesorami ARM.

Komputery SBC bazujące na architekturze ARM

Szybki rozwój architektury ARM oraz znaczny wzrost wydajności spowodował, że zaczęła ona stopniowo wypierać inne rozwiązania, zarówno w dziedzinie mikrokontrolerów jednoukładowych, jak

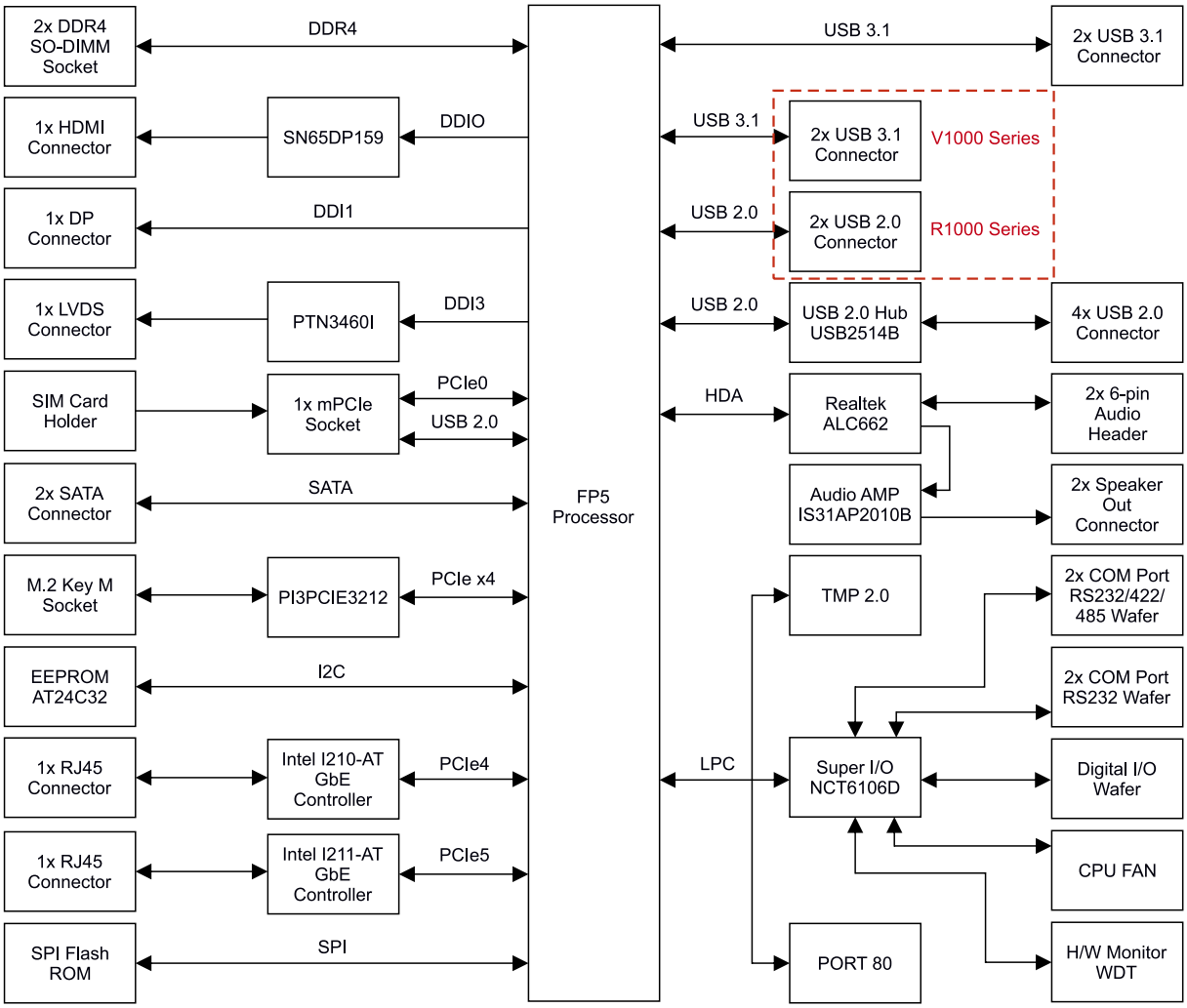
eprasa.pl 85168ce91e

Fotografia 12. Komputer jednopłytkowy 3.5" – SBC-VR1000

i komputerów jednopłytkowych. Sukces ten spowodowany jest stosunkowo dużą wydajnością, przy dużo mniejszym poborze prądu, w porównaniu do komputerów zbudowanych w oparciu na klasycznych mikroprocesorach rodziny x86. Dzięki licencjom udzielanym przez firmę ARM, mikroprocesory są tańsze od konkurencyjnych rozwiązań, z uwagi na to, że są produkowane przez wiele firm konkurujących ze sobą. Na tym polu szczególnie wyróżniają się chińscy producenci, którzy potrafią zaoferować układy SOC w cenie mikrokontrolerów jednoukładowych. W ostatnim czasie na rynku zaczęły pojawiać się układy SOC, mające zintegrowaną pamięć DDRRAM, dzięki czemu projekty zbudowane w oparciu na tego typu rozwiązaniach, są niewiele bardziej skomplikowane od aplikacji mikrokontrolerów jednoukładowych. Do najbardziej znanych producentów układów SOC należą firmy: AllWinner, Texas Instruments, NXP, FreeScale. Komputery jednopłytkowe w dużej większości oparte są na procesorach aplikacyjnych rodziny **CortexA.** Czasami można spotkać komputery jednopłytkowe do zastosowań czasu rzeczywistego z procesorem **CortexR.** Rdzeń **CortexA** jest mikroprocesorem, mającym jednostkę zarządzania pamięcią **MMU** (*Memory Management Unit*) wraz z rozbudowanymi układami pamięci cache. Może on pracować zarówno w trybie jedno- jak i wieloprocesorowym, w zależności od konfiguracji oraz wydajności. Obecnie SOC-e budowane są jako najprostsze jednordzeniowe układy 32-bitowe i wielordzeniowe rozwiązania 64-bitowe. W **tabeli 3** pokazano listę najpopularniejszych rdzeni, wykorzystywanych w komputerach jednopłytkowych.

Firma **ARM** oferuje bogaty zestaw rdzeni, począwszy od najprostszych 32-bitowych układów o wydajności zbliżonej do mikrokontrolerów (np. **Cortex-A7**), po najbardziej wydajne 64-bitowe układy (np. **Cortex-A53/77**), których wydajność jest zbliżona do mikroprocesorów serii **i3/i5/i7**. Producenci układów półprzewodnikowych wykupują w firmie ARM licencję na wybrany rdzeń, wyposażają je w dodatkowe układy peryferyjne, a następnie oferują klientom zewnętrznym w postaci układów SOC. Schemat blokowy typowego układu SOC z rdzeniem ARM pokazuje **rysunek 2**.

We wnętrzu układu możemy znaleźć klasyczne układy peryferyjne znane z mikrokontrolerów, takie jak porty szeregowe, interfejsy USB, przetworniki analogow-ocyfrowe, zintegrowane akceleratory graficzne GPU, układy czasowo-licznikowe, itp. Charakterystyczny dla tego typu rozwiązań jest brak wewnętrznej pamięci RAM oraz pamięci programu FLASH, które muszą być dołączone w postaci zewnętrznych komponentów. Pozostałe układy peryferyjne zintegrowane są we wnętrzu procesora, co pozwala znacząco zmniejszyć koszty produktu. Przyjrzyjmy się teraz najpopularniejszym układom SOC znanych producentów, wykorzystywanych w komputerach jednopłytkowych. Do najbardziej znanych układów należą SOC-e



Rysunek 1. Schemat blokowy komputera 3.5"-SBC-VR1000

eprasa.pl 85168ce91e

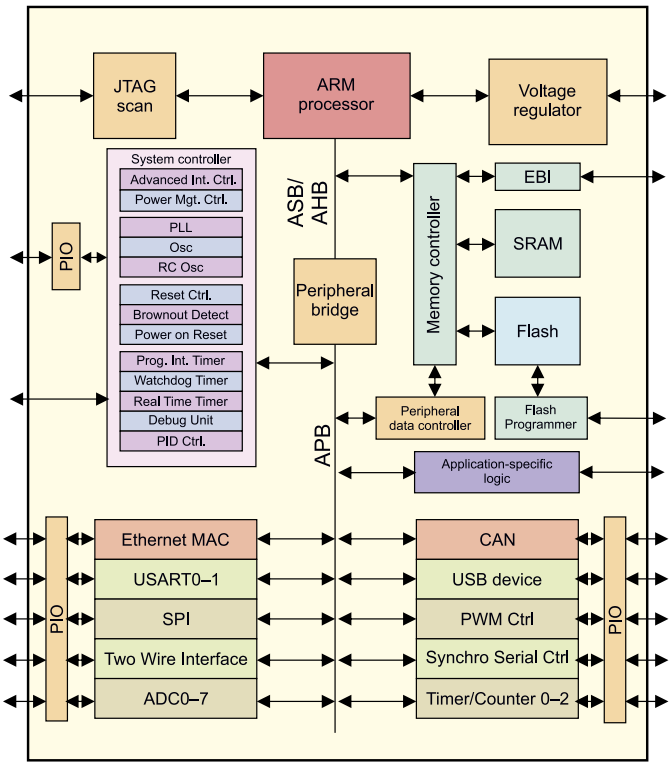
Tabela 3. Polularne rdzenie stosowane w komputerach jednopłytkowych.

Arch	Rdzeń	Cache/MMU	Wydajność	Opis
ARMv7-A	Cortex-A5	4-64 KB/4-64 KB L1, MMU + TrustZone	1.57 DMIPS/MHz na rdzeń	Najmniej wydajny 32-bitowy i najtańszy rdzeń. Obsługuje następujący zestaw instrukcji: ARM/Thumb/Thumb-2/DSP/SIMD/ Optional VFPv4-D16 FPU/Optional NEON/Jazelle RCT and DBX, 1–4 cores
	Cortex-A7	8-64 KB/8-64 KB L1, 0–1 MB L2, MMU + TrustZone	1.9 DMIPS/MHz na rdzeń	Jeden z tańszych 32-bitowych układów. Ma następujący zestaw instrukcji, oraz funkcjonalności: Application profile, ARM/ Thumb/Thumb-2/DSP/VFPv4 FPU/NEON/Jazelle RCT and DBX/ Hardware virtualization, in-order execution
	Cortex-A9	6–64 KB/16–64 KB L1, 0–8 MB L2 opt. parity, MMU + TrustZone	2.5 DMIPS/ MHz na rdzeń	Podstawowy 32-bitowy. Obsługuje następujące instrukcje oraz funkcjonalności: Application profile, ARM/Thumb/Thumb-2/DSP/Optional VFPv3 FPU/Optional NEON
	Cortex-A15	32 KB w/parity/32 KB L1, 0–4 MB L2, L2 razem z ECC, MMU + TrustZone	3.5 – 4.5 DMIPS/MHz na rdzeń w zależności od implementacji	ARM/Thumb/Thumb-2/DSP/VFPv4 FPU/NEON/integer divide/ fused MAC/Jazelle RCT/hardware virtualization out of order, superscalar 1–4 SMP cores, MPCore, Large Physical Address Extensions (LPAE)
ARMv8-A	Cortex-A34	8-64 KB w/parity/8-64 KB w/ECC L1 per core, 128 KB–1 MB L2 shared, 40-bit physical addresses		Jeden z najtańszych 64-bitowych rdzeni. Obsługuje następujące funkcjonalności: AArch64, 1–4 SMP cores, TrustZone, NEON advanced SIMD, VFPv4, hardware virtualization, 2-width decode, in-order pipeline.
	Cortex-A53	8-64 KB w/parity/8-64 KB w/ECC L1 per core, 128 KB–2 MB L2 shared, 40-bit physical addresses	2.3 DMIPS/MHz	Jedna z najbardziej podstawowych architektur. Obsługuje następujace instrukcje oraz funkcjonalności: Application profile, AArch32 and AArch64, 1–4 SMP cores, TrustZone, NEON advanced SIMD, VFPv4, hardware virtualization, 2-width decode, in-order pipeline
	Cortex-A73	64 KB/32-64 KB L1 per core, 256 KB–8 MB L2 shared w/optional ECC, 44-bit physical addresses	4.8 DMIPS/MHz	Rdzeń o wysokiej wydajności. Obsługuje następujace instrukcje i funkcjonalności: AArch32 and AArch64, 1–4 SMP cores, TrustZone, NEON advanced SIMD, VFPv4, hardware virtualization, 2-width superscalar, deeply out-of-order pipeline
	Cortex-A77	.5K L0 MOPs cache, 64/64 KB L1, 256-512 KB L2 per core, 512 KB-4 MB L3 shared		Rdzeń o najwyższej wydajności. Obsługuje następujące instrukcje oraz funkcjonalności: AArch32 (non-privileged level or EL0 only) and AArch64, 1–4 SMP cores, TrustZone, NEON advanced SIMD, VFPv4, hardware virtualization, 4-width decode superscalar, 6-width instruction fetch, 12-way issue, 13 stage pipeline, deeply out-of-order pipeline.

rodziny Sitara produkowane przez Texas Instruments. Są to stosunkowo proste układy o średniej wydajności, jednak mają ugruntowaną pozycję rynkową, z uwagi na bardzo dobre wsparcie oraz wbudowane interfejsy, znajdujące zastosowania w automatyce przemysłowej. Listę układów rodziny Sitara wraz z krótkim opisem pokazano w **tabeli 4**.

W skład rodziny Sitara wchodzi stosunkowo duży wachlarz układów, od najtańszych, z pojedynczym rdzeniem Cortex-A8, po dwurdzeniowe 64-bitowe Cortex-A53. Wśród urządzeń peryferyjnych stanowiących wyposażenie układu SOC, znajdują się procesory graficzne GPU, ze wsparciem dla akceleracji 2D oraz 3D, umożliwiające podłączenie ekranów LCD czy zewnętrznych monitorów. Dodatkowo na standardowym wyposażeniu, w zależności od modelu, mamy interfejsy: USB, kamery, porty ETHERNET, układy CAN. Niektóre z układów mają dodatkowe procesory wspomagające, np. DSP albo dodatkowy rdzeń CortexM, umożliwiający realizację algorytmów czasu rzeczywistego czy przetwarzania DSP, których realizacja nie jest możliwa na procesorze aplikacyjnym, działającym na systemie operacyjnym ogólnego przeznaczenia.

Kolejnym znanym producentem układów SOC dla komputerów jednopłytkowych jest firma **FreeScale**, która słynie z doskonałych i tanich układów o nazwie handlowej **i.MX**. Układy znajdują zastosowania w motoryzacji, przemyśle oraz produktach konsumenckich. Jedną z najważniejszych zalet produktu jest gwarancja dostępności przez minimum 10...15 lat od wypuszczenia na rynek. Pozwala to producentom elektroniki na zmniejszenie kosztu związanego z migracją na nowsze rozwiązania, co często ma miejsce u dalekowschodnich producentów, którzy zaprzestają produkcji układów już po kilku



Rysunek 2. Schemat blokowy typowego układu SOC z rdzeniem ARM

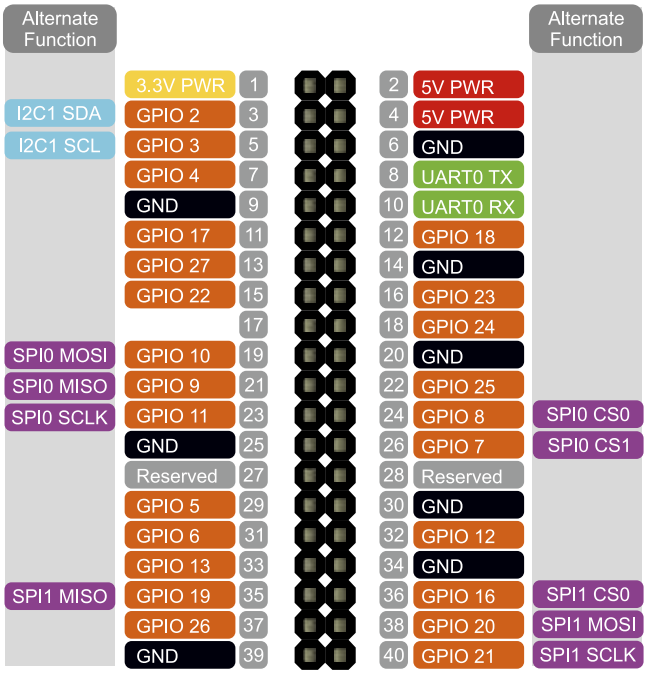
eprasa.pl 85168ce91e

Tabela 4. Lista układów rodziny Sitara

Model	Rdzeń	DMIPS	GPU	Cena	Peryferia
AM335x	Cortex-A8 @1000 MHz	2000	SGX530	4,96 USD	LCD Controller, 10/100/1000 Mbit/s EMAC, 2×CAN USB OTG + PHY, 2×PRU-ICSS
AM37x	Cortex-A8 @1000 MHz	2000	SGX530	12,25 USD	Display Subsystem, Video In/Out, USB, Lowest power
AM437x	Cortex-A9@1000 MHz	2500	SGX530	9 USD	10/100/1000 Mbit/s Ethernet Switch w/2 Ports, 4×PRU-ICSS Dual camera support, Secure boot
AM57x	2×Cortex-A15 @1,5 GHz + 2×C66 DSP @750 MHz + Cortex-M4 @212 MHz	10500	SGX544	28 USD	10/100/1000 Mbit/s Ethernet Switch w/2 Ports, 4×PRU-ICSS (100 Mbps Ethernet) multiple Video Input Ports (parallel or CSI), USB 3.0, PCIe, SATA, and Secure Boot
AM65x	2×Cortex-A53 @1,1 GHz + Cortex R5F @400 MHz	10120	SGX544	N/A	10/100/1000 Mbit/s Ethernet Port, 3×PRU-ICSSG (6×Gigabit Ethernet), PCIe Gen3, USB 3.0, and embedded Device Management Security Controller (DMSC) with Secure Boot

latach. Seria **i.MX** jest bardziej rozbudowana w porównaniu z poprzednio omówioną rodziną, a do dyspozycji mamy następujące typy układów:

- **i.MX5 –** bazująca na pojedynczym rdzeniu CortexA8, wyposażona w akcelerator graficzny z460 firmy **Imageon.** Seria ta była chętnie stosowana w czytnikach e-booków;
- **i.MX6 –** bazująca na pojedynczym, podwójnym albo poczwórnym rdzeniu CortexA9, które pracują z częstotliwością do 1 GHz. Została wykonana w litografii 40 nm. Zawiera akcelerator graficzny Vivante GC400/2000/400. W zależności od modelu, dodatkowo może zawierać rdzeń CortexM4;
- **i.MX7 –** bazująca na pojedynczym lub podwójnym rdzeniu Cortex-A7 wraz z dodatkowym procesorem CortexM4. Zaprojektowana w technologii 28 nm z myślą o rozwiązaniach przemysłowych. Pozbawiona koprocesora graficznego;
- **i.MX8 –** pierwszy 64-bitowy układ SOC zaprezentowany w 2016 roku zawierający w zależności od konfiguracji 4×Cortex-A53 + 2×Cortex-A72 oraz podwójny akcelerator graficzny Vivante GC7000, umożliwiający zarówno kodowanie, jak i dekodowanie wideo H265. Rodzina wyposażona jest również w podwójny rdzeń CortexM4, na którym możemy uruchomić system operacyjny typu RTOS;
- **I.MX8M –** zaprezentowana w 2017 roku, charakteryzująca się następującymi parametrami: poczwórny rdzeń Cortex-A53 + CortexM4F, obsługa pamięci DDR4, USB 3.0 + PHY, dwa interfejsy USB 3.0 typ C, dwa interfejsy PCIE×1, HDMI 2.0, Ethernet gigabitowy, kodowanie i dekodowanie wideo 4 k H264 i H265, SAI, UART, SDIO.



Rysunek 3. Schemat złącza Raspberry-Pi

W zależności od wymagań możemy skorzystać z najprostszych jednordzeniowych układów albo wydajnych rozwiązań wielordzeniowych wraz ze wsparciem dla obsługi wideo. Nie bez znaczenia jest również wsparcie techniczne ze strony producenta. Do dyspozycji mamy kod źródłowy dla bootloadera BSP, sterowniki urządzeń dla jądra Linuksa, oraz dodatkowe sterowniki dla enkodera i dekodera wideo. Jeśli chodzi o systemy operacyjne, możemy skorzystać zarówno z systemu **Linux, jak i systemu Android, FreeBSD, OpenBSD.** Zatem wybór rozwiązań jest bardzo duży.

Innym znanym producentem jest chińska firma **AllWinner**, która pierwotnie zajmowała się dostarczaniem układów SoC dla najtańszych tabletów. Z czasem producenci komputerów jednopłytkowych dostrzegli potencjał tych układów, polegający na bardzo niskich cenach, niejednokrotnie zbliżonych do cen mikrokontrolerów jednoukładowych i coraz częściej stosowali tego typu układy w komputerach SBC. Portfolio układów firmy skupia się wokół linii A, przeznaczonej do aplikacji multimedialnych, w skład której wchodzą następujące typy układów:

- **Seria A2x/A3x** – zbudowana w oparciu o dwa rdzenie Cortex-A7, ze zintegrowanym układem graficznym MALI400. Charakteryzuje się bardzo niskim kosztem zakupu rzędu 4 USD za sztukę;
- **Seria A5x** – wykonana w technologii 28 nm, wykorzystująca poczwórny rdzeń Cortex-A7, pracująca z częstotliwością 1,8 GHz oraz akceleratorem graficznym Mali P400MP2;
- **Seria A6x** – wykonana w technologii 28 nm, w oparciu na poczwórnym rdzeniu Cortex-A63, z akceleratorem graficznym Mali T760 MP2 oraz wsparciem dla kodowania i dekodowania wideo w rozdzielczości 4 k;
- **A10x/A20x/A30x** – nowa linia zapowiedziana w 2019 roku. Do tej pory jeszcze nie podano specyfikacji tych układów, zapowiadając jedynie, że będą bardzo wydajne i tanie.

Jeśli chodzi o wsparcie programowe, to do dyspozycji mamy system Linux. Jednak z uwagi na dużą liczbę „binarnych blobów" zawierających nieznany kod, firma wzbudza wiele kontrowersji, również poprzez nagminne łamanie licencji GPL. Bezpieczeństwo układów także jest kontrowersyjne, ponieważ w jądrze opublikowanym przez firmę zaleziono „tylną furtkę" umożliwiającą każdej zainstalowanej aplikacji dostęp do uprawnień roota (administratora). Firma nie gwarantuje czasu życia produktu. Nie ma zatem żadnej gwarancji dostępności układów w dłuższym okresie, co dyskwalifikuje je w poważnych zastosowaniach przemysłowych.

Przejdźmy teraz do przeglądu komputerów jednopłytkowych, bazujących na rozwiązaniach SOC z układami ARM. Jeśli chodzi o wymiary takich komputerów, panuje tutaj większy bałagan niż w przypadku komputerów bazujących na x86. Istnieją co prawda płytki ARM zgodne ze standardem PC104, jednak stanowią one rzadkość, a producenci chętnie stosują własne rozwiązania niekompatybilne ze sobą. W ostatnim czasie możemy zaobserwować pewien

eprasa.pl 85168ce91e

Fotografia 13. Komputer jednopłytkowy na złączu SODIMM

postęp, ponieważ część producentów stara się dostosować zestaw złączy i zapewnić kompatybilność z komputerem Raspberry Pi, którego złącze główne pokazano na **rysunku 3**. Jest to klasyczne złącze męskie IDC40 z wyprowadzonymi funkcjami GPIO oraz zasilaniem, dodatkowo zdefiniowano funkcje alternatywne magistrali I²C, SPI oraz zasilanie 3,3 V oraz 5 V.

Kolejnym coraz częściej spotykanym rozwiązaniem, urastającym do miana standardu, są komputery, które wykorzystują tanie i popularne złącza SODIMM, stosowane głównie w pamięciach do laptopów. W tym przypadku moduł, zamiast układów pamięci DDR PCB, zawiera kompletny komputer jednopłytkowy, który następnie jest wstawiany do bazy, wyposażonej w odpowiednie złącze. Przykład takiego rozwiązania pokazuje **fotografia 13.**

Rozwiązanie tego typu jest bardzo wygodne, ponieważ najbardziej skomplikowany fragment PCB, zawierający interfejsy pamięciowe DDR oraz inne sygnały szybkozmienne, znajdują się na stosunkowo małej, wielowarstwowej płytce PCB. Natomiast komponenty charakteryzujące się mniejszymi częstotliwościami pracy możemy umieścić na czterowarstwowej płytce bazowej. Do wad tego typu rozwiązań można zaliczyć brak odporności na silne wstrząsy, więc nie nadają się do układów automotive czy niektórych zastosowań przemysłowych.

Przegląd płytek SBC rozpoczniemy od doskonale wszystkim znanego komputera **Raspberry Pi** (**fotografia 14**), który doczekał się czwartej odsłony. Komputer wdarł się przebojem na rynek, do tego stopnia, że prasa ogólnopolska pisała o nim w dziale technologie, czego nigdy wcześniej nie odnotowano w tego typu przypadkach. Komputer przez ową prasę był polecany głównie jako tani zamiennik domowego peceta, co jest nietrafionym zastosowaniem, z uwagi na małą moc obliczeniową.

Układ zawiera 4 GB pamięci operacyjnej, wyposażony jest w czterordzeniowy 64-bitowy procesor, z wysokowydajnymi rdzeniami **Cortex-A72**. Do komunikacji z siecią, służy moduł Wi-Fi 2,4 GHz/5 GHz lub port Ethernet. Urządzenie dysponuje układem graficznym, wspomagającym grafikę 3D czy dekodowanie strumieni wideo. Największą zaletą rozwiązania jest bogata dokumentacja techniczna, mnóstwo przykładowego oprogramowania oraz doskonałe wsparcie społeczności. Komputer ten często znajduje zastosowanie przy opracowaniu prototypów oraz do realizacji hobbystycznych projektów. Z uwagi na umiejscowienie złączy oraz zastosowane komponenty nie jest on przeznaczony do zastosowań przemysłowych. Dostępna jest również duża liczbę akcesoriów oraz dodatkowych modułów, przeznaczonych do współpracy z tym urządzeniem, takich jak obudowy czy dodatkowe płytki dołączane do 40-wyprowadzeniowego złącza, które pełni funkcję swoistego standardu.

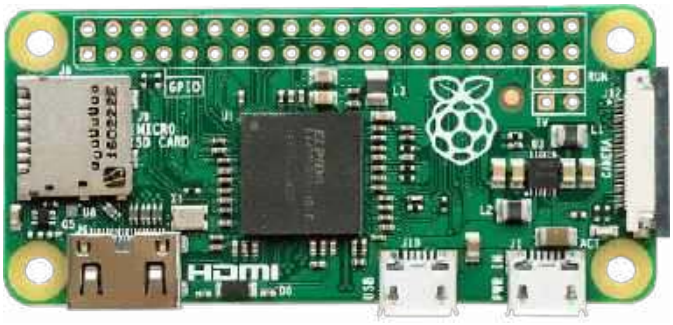
Przy omawianiu **Raspberry** warto wspomnieć również o skromniejszym bracie **Raspberry Pi Zero** (**fotografia 15**), który ma jednordzeniowy układ **SoC,** z nieco już leciwym rdzeniem Cortex-A11. Wyposażony jest on w 512 MB pamięci operacyjnej oraz procesor graficzny, umożliwiający wyświetlanie obrazu.

Największą zaletą tego komputera jest jego cena, wynosząca około 30 zł co stawia pod znakiem zapytania sensowność używania większych mikrokontrolerów jednoukładowych w niektórych prototypowych zastosowaniach. Należy mieć na uwadze, że model ten do działania potrzebuje karty SD, co podnosi koszty. Istotną zaletą jest to, że nie wlutowano złącza, a jedynie zostawiono pole lutownicze, więc możemy go połączyć z płytką bazową np. za pomocą odpowiednich kołków. Konstrukcja nie jest przeznaczona do stosowania w warunkach przemysłowych, zatem jeśli myślimy o poważniejszych zastosowaniach, dużo lepszym rozwiązaniem jest użycie płytki, która ma zintegrowaną pamięć **NAND Flash lub eMMC**.

Innym ciekawym rozwiązaniem są komputery **SOM** firmy SOMLabs, które bazują na opisanym wcześniej formacie złącza SODIMM. Zestaw składa się z dwóch części: komputera oraz odpowiadającej mu płyty bazowej, którą będziemy mogli wykorzystać na etapie projektowania i prototypowania. Obecnie w ofercie firmy dostępne są następujące komputery jednopłytkowe:

- **SLS16Yx** – moduł bazujący na tanim układzie SOC i.MX 6ULL, taktowanym zegarem 900 MHz. Ma 512 MB pamięci DDR3 oraz 32 GB pamięci FLASH. Wyposażony jest również w opcjonalny moduł Wi-Fi firmy Murata. Jest to jeden z podstawowych i najtańszych modułów dostępnych w ofercie;
- **SLS12Rx –** moduł bazujący na procesorze I.MX RT i rdzeniu CortexM7, taktowanym zegarem 528 MHz. Wyposażony jest w 256 MB pamięci DRAM oraz pamięć FLASH, o wielkości do 16 MB. Moduł przeznaczony jest dla systemów operacyjnych czasu rzeczywistego, np. możemy na nim uruchomić FreeRTOS. Jest to jedyny moduł w ofercie, niekorzystający z procesorów aplikacyjnych serii A.

Fotografia 14. Komputer jednopłytkowy Raspberry Pi 4



Fotografia 15. Komputer jednopłytkowy Raspberry Pi Zero

eprasa.pl 85168ce91e

Fotografia 16. Płyta przeznaczona do współpracy z modułem SLS23

Fotografia 18. Komputer jednopłytkowy Nvidia Jetson Nano

- **SLS18 –** moduł bazujący na pierwszym układzie SOC firmy STM STM32MP1, mający rdzeń CortexA7 taktowany zegarem do 800 MHz oraz dodatkowy rdzeń CortexM4 taktowany do 200 MHz. Układ zawiera akcelerator graficzny GPU Vivante, 512 MB pamięci DDR3 oraz 32 GB pamięci eMMC FLASH. Opcjonalnie może być wyposażony w moduł Wi-Fi Bluetooth firmy Murata.
- **SLS23 –** to najbardziej wydajny moduł dostępny w ofercie, integrujący 4-rdzeniowy układ zgodny z rdzeniem CortexA53, taktowany zegarem do 1,8 GHz (i.MX8M). Dodatkowy rdzeń CortexM4 może służyć za koprocesor czasu rzeczywistego. Zawiera również rozbudowany układ graficzny Vivante GC320, sprzętowy dekoder H264/265 oraz interfejs Ethernet 1 Gbps.

Do każdego z zestawów producent oferuje podstawowe płytki bazowe, umożliwiające rozpoczęcie procesu prototypowania oraz projektowania oprogramowania urządzenia, z wykorzystaniem powyższych modułów. Na **fotografii 16** pokazano płytę, przeznaczoną do współpracy z modułem **SLS23**. Zawiera ona złącze SO-DIMM (do którego należy podłączyć komputer), złącza MIPIDSI, MIPICSI, złącze Ethernet, PCIE. Godny odnotowania jest również fakt wyprowadzenia złącza IDC40, zgodnego z wyprowadzeniami Raspberry Pi.

Jeżeli wydajność nie jest kluczowym czynnikiem, dobrym wyborem wydają się płytki wyposażone w mikrokontroler **Sitara AM335x** firmy Texas Instruments (**fotografia 17**). Ciekawym rozwiązaniem wykorzystującym ten układ jest BeagleBone Black, taktowany z częstotliwością 1 GHz, mający 512 MB pamięci RAM oraz 4 GB pamięci FLASH. Komputer ma podstawowe interfejsy komunikacyjne: USB, HDMI oraz Ethernet.

Ciekawym rozwiązaniem do nabycia za około 100 zł jest płytka **Nano Pi Neo 2**, dysponująca 64-bitowym 4-rdzeniowym procesorem **Cortex-A53,** taktowanym zegarem 1 GHz. Rozwiązanie wyposażone jest w 512 GB pamięci operacyjnej DDR3 oraz pamięć eMMC o wielkości 8 GB, na której możemy zainstalować system operacyjny oraz nasze oprogramowanie. Jeśli chodzi o interfejsy komunikacyjne, do dyspozycji mamy gigabitowe złącze Ethernet oraz dwa porty USB.

Jeżeli w projekcie wymagana jest duża moc obliczeniowa oraz wsparcie GPU, np. do przetwarzania obrazów czy wirtualnej rzeczywistości, bardzo ciekawą propozycją jest płytka Nvidia Jetson Nano (**fotografia 18**) wyposażona w 4-rdzeniową jednostkę centralną z rdzeniami Cortex-A53 oraz procesor graficzny Nvidia Maxell ze 120-rdzeniami CUDA. Całość taktowana jest częstotliwością 1,43 GHz.

Jeśli potrzebujemy komputera o bezkompromisowej wydajności zarówno dla mocy obliczeniowej CPU, jak i GPU, np. w rozwiązaniach rzeczywistości wirtualnej, inteligentnych samochodach, dronach itp. możemy skorzystać z płytki **Jetson TX2 firmy Nvidia** (**fotografia 19**). Komputer wyposażony jest w GPU w architekturze PASCAL, zawierającą 256 rdzeni CUDA o łącznej wydajności 1.3 TFLOPS. Jeśli chodzi o CPU, ma dwa wysokowydajne autorskie rdzenie **Denver 2** oraz 4 rdzenie **Corex-A57**. Dodatkowo procesor zawiera sprzętowe kodeki audio i wideo, pracujące w rozdzielczości 4 k, interfejs do kamery oraz wyświetlacza. Układ charakteryzuje się poborem prądu na poziomie 7,5 W. Bardzo istotny jest również fakt, że producent zapewnia pełne wsparcie programowe zarówno dla GPU, jak i CPU. Wysoka wydajność niestety okupiona jest stosunkowo wysoką ceną, która wynosi około 400 USD.

Oprogramowanie oraz wsparcie

Oprócz samego sprzętu, bardzo ważne jest oprogramowanie oraz wsparcie udzielane przez producenta. Nawet najlepsza i tania płytka nie będzie godna uwagi, pozbawiona wsparcia lub sterowników urządzeń dla układów peryferyjnych. Dlatego warto wybrać takiego producenta, który gwarantuje długą dostępność produktu oraz wsparcie techniczne na odpowiednim poziomie. Nie każda firma ma wystarczające zasoby ludzkie, aby zapewniać wsparcie dla komputera SBC

Fotografia 17. Mikrokontroler Sitara AM335x firmy Texas Instruments

Fotografia 19. Komputer jednopłytkowy Jetson TX2

eprasa.pl 85168ce91e

we własnym zakresie. Cała siła komputerów jednoukładowych drzemie w przeniesieniu wsparcia na firmę producenta, co pozwala zaoszczędzić czas oraz pieniądze i jest istotne w przypadku produkcji niskonakładowej.

Jeśli chodzi o wybór systemów operacyjnych dla komputerów jednopłytkowych, to w systemach wbudowanych króluje Linux, z uwagi na przenośność, dostępność kodu źródłowego oraz wsparcie społeczności. System GNU/Linux możemy uruchomić w zasadzie na dowolnym komputerze jednopłytkowym zarówno zbudowanym na architekturze x86, jak i ARM (może z wyjątkiem komputerów z rdzeniem CortexM/R). Z uwagi na otwartość systemu, możemy wykorzystać gotowe dystrybucje lub, jeśli zależy nam na wydajności, zbudować bezpośrednio z kodu źródłowego, np. bazując na narzędziu **Yocto**. Dostępność źródeł znacząco upraszcza późniejszą analizę kodu oraz umożliwia uzyskanie maksimum wydajności z danego komputera, poprzez ustawienie odpowiednich flag kompilacji czy wykorzystanie tylko niezbędnych komponentów. Jeśli zakupiliśmy komputer jednopłytkowy, zazwyczaj otrzymamy zestaw sterowników urządzeń dostępnych na płytce, czy dystrybucję Linuksa opracowaną przez producenta. Nie bez znaczenia jest również fakt, że korzystając z otwartego oprogramowania, nie musimy ponosić kosztów licencji, które w przypadku systemu Windows bywają równoważne wartości zastosowanego sprzętu. Istotnym faktem jest również to, że system Windows w zasadzie dostępny jest jedynie dla komputerów zgodnych z x86. Istnieje co prawda dystrybucja Windows przeznaczona dla architektury ARM, jednak model dystrybucyjny oprogramowania dla Windows, w postaci kodu binarnego aplikacji, dyskwalifikuje to rozwiązanie.

Podsumowanie

Szeroka dostępność komputerów jednopłytkowych, zarówno o wydajności niewiele większej od mikrokontrolerów, po bardzo rozbudowane układy o wydajności komputerów PC, pozwala producentom na tworzenie urządzeń w niewielkich seriach produkcyjnych, które mają zaskakujące możliwości, bez poświęcania dużych nakładów i środków na przygotowanie sprzętu oraz oprogramowania. Wystarczy zaprojektować odpowiedni moduł wykonawczy dla komputera SBC oraz napisać aplikację końcową, realizującą wymagane zadania. Wszystkie problemy związane z pisaniem sterowników urządzeń oraz inne zagadnienia niskopoziomowe, związane z systemem, zostają przerzucone na producenta SBC, a my możemy się skupić na funkcjonalności. Dzięki takiemu podejściu znacząco zmniejszamy czas, potrzebny na opracowanie produktu i dostarczenia go na rynek, zmniejszając koszty R&D. Najbardziej wydajne komputery SBC często również są wykorzystywane w rozwiązaniach typu info kioski, czy systemy rozrywki, ponieważ są tańsze od komputerów PC, a ich wydajność w tych zastosowaniach jest wystarczająca. Nie bez znaczenia jest również dużo mniejszy pobór energii (procesory ARM). W przypadku, gdy zależy nam na utrzymaniu zgodności programowej z komputerem PC i systemem Windows, będziemy musieli skorzystać z układów zbudowanych w oparciu na mikroprocesorach x86.

Lucjan Bryndza, EP
lucjan.bryndza@boff.pl

REKLAMA

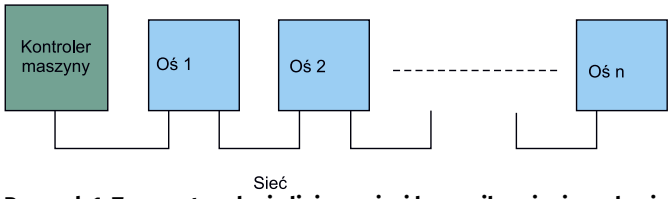
eprasa.pl 85168ce91e

Zależności czasowe w nowoczesnych robotach wieloosiowych

Współczesna robotyka przemysłowa i systemy obrabiarek numerycznych wymagają precyzyjnego, skoordynowanego ruchu wielu osi systemu. Typowe roboty przemysłowe mają sześć stopni swobody (osi ruchu), które bardzo często muszą poruszać się wspólnie w skoordynowany sposób. Podobnie jest w przypadku obrabiarek CNC, gdzie konieczna jest koordynacja od 5 do nawet 12 osi.

Synchronizacja wielu napędów w robotach przemysłowych jest krytycznym elementem, zapewniającym im grację i sprawność działania. Poszczególne sterowniki serwomechanizmów itp. połączone są ze sobą przemysłowymi interfejsami komunikacyjnymi – zazwyczaj industrialną odmianą Ethernetu – w topologii linii, jak pokazano na **rysunku 1**. Do sieci tej podłączony jest również centralny sterownik całej maszyny, który na podstawie zadanej trajektorii ruchu wydaje polecenia każdemu z serwomechanizmów.

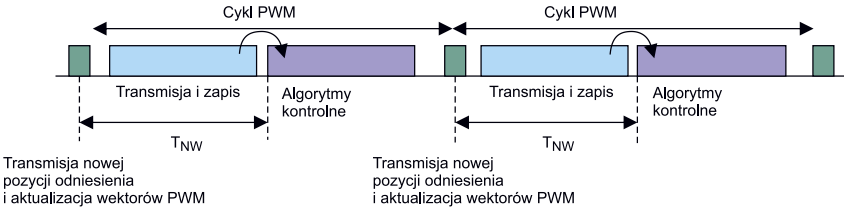
Synchronizacja w czasie ruchów poszczególnych osi jest konieczna, aby maszyny te działały poprawnie. Wraz ze zwiększaniem szybkości działania systemów przemysłowych, synchronizacja działania poszczególnych osi w tego rodzaju układach staje się coraz większym wyzwaniem. W liniowej sieci, jaką pokazano na rysunku 1, komendy wysyłane są cyklicznie do każdej osi maszyny w ściśle określonej kolejności.



Rysunek 1. Typowa topologia liniowa sieci komunikacyjnej w robocie przemysłowym

Cykl kontrolny

Aplikacje tego rodzaju działają w określonym okresie cyklu, którego czas trwania jest zwykle równy wielokrotności podstawowego cyklu przełączania pętli sterowania i modulacji szerokości impulsu (PWM) podstawowego napędu serwomotoru. Opóźnienie transmisji w sieci od końca do końca jest kluczowym, w tym kontekście, parametrem (**rysunek 2**). W każdym okresie cyklu nowe informacje dotyczące pozycji i inne istotne informacje muszą być przesyłane ze sterownika



Rysunek 2. Cykl PWM i czas transmisji w sieci

eprasa.pl 85168ce91e

maszyny do każdego węzła z rysunku 1. Następnie musi pozostać wystarczająco dużo czasu w cyklu PWM dla każdego węzła, aby zaktualizować ustawienia poprzez algorytm sterowania serwomechanizmem przy użyciu nowego punktu odniesienia dla pozycji, jak również wszelkich nowych danych z czujników. Każdy węzeł stosuje następnie zaktualizowane nastawy PWM do sterowania serwonapędu w tym samym momencie, dzięki synchronizacji wykorzystującej rozproszony sygnał zegarowy, który jest uzależniony od zegara sieci przemysłowej Ethernet.

W zależności od architektury sterowania, część algorytmu pętli sterowania może być zaimplementowana w sterowniku PLC, co sprawia, że wymaga odpowiedniej ilości czasu, który musi pozostać po otrzymaniu wszelkich odpowiednich aktualizacji informacji z sieci.

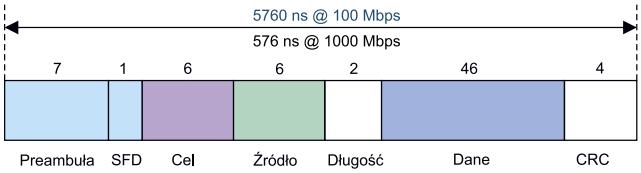
Opóźnienia w transmisji danych

Zakładając, że jedynym ruchem w sieci są cykliczne dane przepływające między sterownikiem maszyny a węzłami serwosilników, opóźnienie sieci (TNW) jest określane przez liczbę przeskoków sieci do najdalszego węzła, szybkość transmisji danych w sieci i napotkane po drodze opóźnienia w każdym węźle. W kontekście robotyki i obrabiarek numerycznych opóźnienie propagacji sygnału wzdłuż przewodu można pominąć, ponieważ długość kabla jest zwykle stosunkowo niewielka. W bardziej rozległych instalacjach może to być jednak istotne. Przyjmuje się prędkość propagacji sygnału w kablu ethernetowym za równą 230 m/μs, co oznacza, że każdy metr kabla sieciowego wnosi 4,35 ns opóźnienia.

Dominującym opóźnieniem sieci Ethernet jest opóźnienie wynikające z jej przepustowości; to znaczy czas potrzebny na przesłanie danych do sieci zależy wyłącznie od jej prędkości. W przypadku ramki Ethernet o minimalnym rozmiarze (typowej dla obrabiarek i sterowania robotami) opóźnienie w przepustowości zobrazowano na **rysunku 3** dla szybkości transmisji 100 Mb/s i 1 Gb/s. Jest to po prostu rozmiar pakietu podzielony przez szybkość transmisji danych.

Typowy pakiet danych dla systemu wieloosiowego wychodzący od kontrolera do serwomechanizmu składałby się z 4-bajtowej aktualizacji odniesienia danych prędkości i pozycji oraz 1-bajtowej aktualizacji słowa sterującego dla każdego serwomechanizmu, co oznacza 30-bajtowy pakiet danych dla robota o 6 stopniach swobody. Oczywiście niektóre aplikacje będą przenosić więcej informacji w pojedynczej aktualizacji lub będą miały więcej osi, w którym to przypadku mogą być potrzebne pakiety o rozmiarze większym niż minimalny.

Oprócz opóźnienia wynikającego z przepustowości, dodatkowe opóźnienia występują w wyniku przejścia ramki Ethernet przez elementy warstwy fizycznej i 2-portowe switche znajdujące się w każdym interfejsie sieci sterującej. Opóźnienia te są pokazane na **rysunku 4** i **rysunku 5**, gdzie widoczne jest przejście ramki przez PHY do MAC (1-2), poprzez analizę adresu docelowego, gdzie tylko preambuła i część docelowa ramki muszą być analizowane. Ścieżka 2-3a reprezentuje wyodrębnianie danych użytkowych dla bieżącego węzła, podczas gdy ścieżka 2-3b reprezentuje dalszą podróż ramki do węzła (węzłów) znajdującego się dalej w linii. Rysunek 4a pokazuje tylko pakiet danych przesyłany do aplikacji w 2-3a, podczas gdy rysunek 4b przedstawia większość przekazywanej ramki; pokazuje to niewielkie różnice, które mogą wystąpić między protokołami ethernetowymi. Ścieżka 3b-4 reprezentuje transmisję ramki wychodzącej przez kolejkę nadawczą, PHY i z powrotem do skrętki. Taka ścieżka nie występuje w węźle końcowym linii, jak pokazano na rysunku 4b. Zakłada się tutaj przełączanie pakietów typu „cut-through" (odcięcie) zamiast „store-and-forward" (przechowaj i podaj dalej), które ma znacznie większe opóźnienie, ponieważ cała ramka musi być taktowana w switchu, zanim zostanie przesłana dalej do procesora.

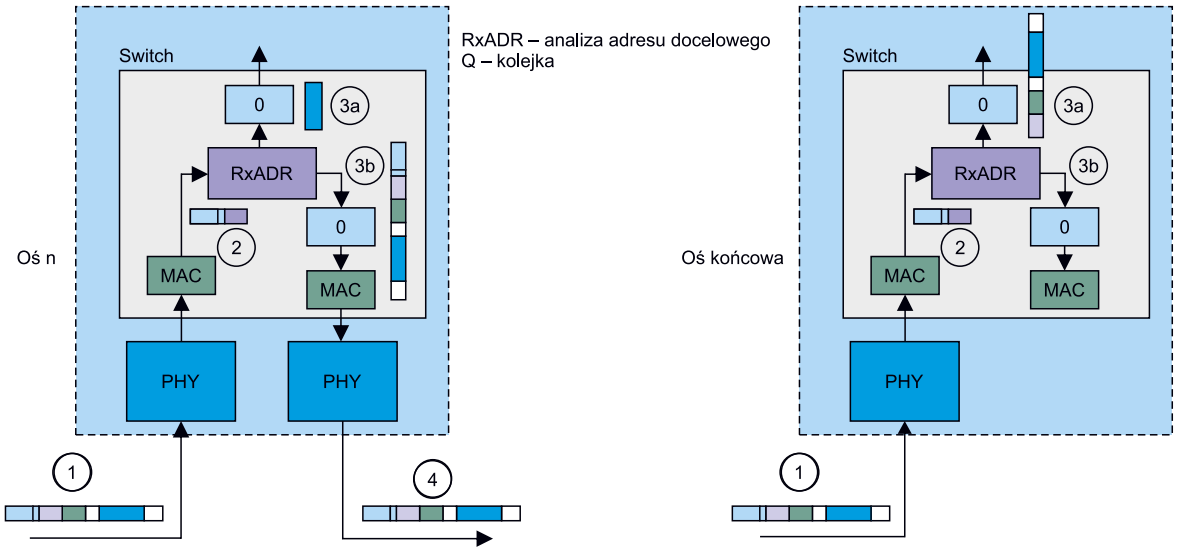


Rysunek 3. Opóźnienie wynikające z pasma minimalnej ramki sieci Ethernet

Elementy opóźniające ramki są również pokazane na rysunku 5 na osi czasu, na której zilustrowano całkowity czas transmisji ramki przez jeden węzeł osi. T_{BW} reprezentuje opóźnienie wynikające ze skończonej przepustowości, podczas gdy T_{L_1node} reprezentuje opóźnienie ramki przechodzącej przez pojedynczy węzeł sieci. Oprócz opóźnień związanych z fizyczną transmisją bitów przewodem i taktowaniem bitów adresowych podczas analizy adresu docelowego, inne elementy wpływające na opóźnienia transmisji w systemie

Tabela 1. Opóźnienia modułów warstwy fizycznej i switchy

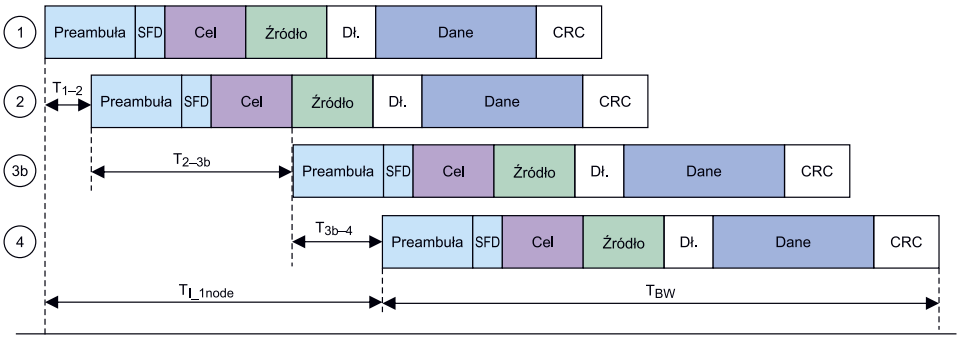
Element opóźniający	Nazwa układu	Czas
Odbiornik PHY	ADIN1200	248 ns
Nadajnik PHY	ADIN1200	52 ns
Switch – preambuła i określenie celu	fido5000	1120 ns (14 bajtów przy 100 Mbps)
Switch – MAC, kolejkowanie i odbiór	fido5000	330 ns



Rysunek 4. Opóźnienie ramek: a) w węźle dwupunktowym, b) w węźle końcowym (jednopunktowym)

eprasa.pl 85168ce91e

to elementy warstwy fizycznej i opóźnienia komponentów switcha. Wraz ze wzrostem prędkości transmisji i zwiększeniem liczby węzłów w sieci te opóźnienia stają się jeszcze ważniejsze dla całkowitego opóźnienia transmisji ramek od końca do końca sieci.



Rysunek 5. Opóźnienia pokazane na osi czasu

Rozwiązania z niską latencją

Firma Analog Devices wprowadziła do swojej oferty, w pierwszej połowie tego roku, dwa nowe układy dla warstwy fizycznej (Ethernet PHY), zaprojektowane do niezawodnego działania w trudnych warunkach przemysłowych, z małym poborem prądu i w rozszerzonych zakresach temperatur otoczenia (do 105°C) z rekordowymi specyfikacjami dotyczącymi opóźnień. Układy ADIN1300 i ADIN1200 zostały opracowane specjalnie, aby sprostać wyzwaniom przedstawionym w pierwszej części tego artykułu.

Dzięki wieloprotokołowemu, zintegrowanemu 2-portowemu switchowi Ethernet fido5000, który polecany jest do pracy w czasie rzeczywistym, układy ADI umożliwiają lepsze stworzenie rozwiązania dla deterministycznych aplikacji wrażliwych na czas.

Opóźnienia wprowadzone przez układy PHY i switche są wymienione w **tabeli 1**, przy założeniu, że analiza bufora odbioru jest oparta na adresie docelowym i przy sieci pracującej z prędkością 100 Mbps. Dla przykładu, agregując te opóźnienia przy sieci liniowej 7-osiowej obrabiarki numerycznej i włączając taktowanie pełnego ładunku dla końcowego węzła (patrz 3a na rysunku 4), całkowite opóźnienie transmisji można wyliczyć w następujący sposób:

$$6\times T_{L_1node}+T_{BW}+T_{node7}=6\times(248\ ns+330\ ns+1120\ ns+58\ ns)+5760\ ns+(248\ ns+1120\ ns+58\times 80\ ns)=22{,}3\ \mu s.$$

gdzie 58×80 ns reprezentuje pozostały, 58-bajtowy pakiet danych, pozostały po odczytaniu preambuły i bajtów adresu docelowego.

Obliczenia zakładają, że nie ma innego ruchu w sieci lub że sieć jest zarządzana tak, aby umożliwić priorytetowy dostęp dla ruchu wrażliwego na czas. Jest to również w pewnym stopniu zależne od protokołu, z niewielkimi różnicami w obliczeniach, w zależności od konkretnego używanego protokołu przemysłowego Ethernetu. Odnosząc się do rysunku 2, w systemie z czasami cyklu do 50 µs do 100 µs, transmisja ramki do najdalszego węzła może zająć prawie 50% tego cyklu, skracając czas dostępny na aktualizację ustawień systemu sterowania silnikiem i wykonanie niezbędnych obliczeń przez algorytm sterowania dla następnego cyklu. Dlatego też minimalizacja czasu transmisji jest ważna dla optymalizacji wydajności systemu, ponieważ umożliwia dłuższe i bardziej złożone obliczenia sterujące. Biorąc pod uwagę, że opóźnienia związane z transmisją danych są stałe i związane z przepustowością siei, wykorzystanie komponentów o niskich opóźnieniach, takich jak ADIN1200 czy fido5000, jest kluczem do optymalizacji działania układu, zwłaszcza gdy wzrasta liczba węzłów (na przykład 12 osi dla maszyny CNC) i skracają się czasy cykli.

Przejście na gigabitowy Ethernet radykalnie zmniejsza wpływ opóźnienia wynikającego z przepustowości sieci, ale zwiększa proporcję całkowitego opóźnienia wprowadzanego przez przełącznik i komponenty warstwy fizycznej. Na przykład 12-osiowa maszyna CNC w sieci gigabitowej będzie miała opóźnienie transmisji sieciowej wynoszące około 7,5 µs. Składowa wynikająca z przepustowości sieci jest pomijalna i nie ma większego znaczenia, czy używane są minimalne, czy maksymalne rozmiary ramek Ethernet. Opóźnienie sieci jest podzielone w przybliżeniu równo między warstwę fizyczną i switche, co podkreśla wartość w minimalizowaniu opóźnień w tych elementach, gdy systemy przemysłowe zbliżają się do prędkości gigabitowych, skracają się czasy cykli sterowania (EtherCAT osiąga na przykład czas cyklu równy 12,5 µs), a liczba węzłów rośnie z uwagi na dodawanie kolejnych czujników podłączonych do sieci Ethernet w sieci sterowania i spłaszczenie topologii sieci.

Podsumowanie

W wysokowydajnych, wieloosiowych aplikacjach ruchu synchronicznego wymagania dotyczące taktowania systemów sterowania są jasne – muszą być one precyzyjne, deterministyczne i krytyczne czasowo, z wymogiem minimalizacji opóźnień w transmisji, zwłaszcza gdy czasy cykli sterowania stają się krótsze, a złożoność algorytmu sterowania wzrasta.

Elementy warstwy fizycznej o niskim opóźnieniu i wbudowane switche stają się ważnymi elementami optymalizacji tych systemów. Aby sprostać wyzwaniom przedstawionym w tym artykule, firmy takie jak Analog Devices wprowadzają nowe układy scalone do pracy w sieciach o różnej przepustowości z minimalnymi opóźnieniami w transmisji danych.

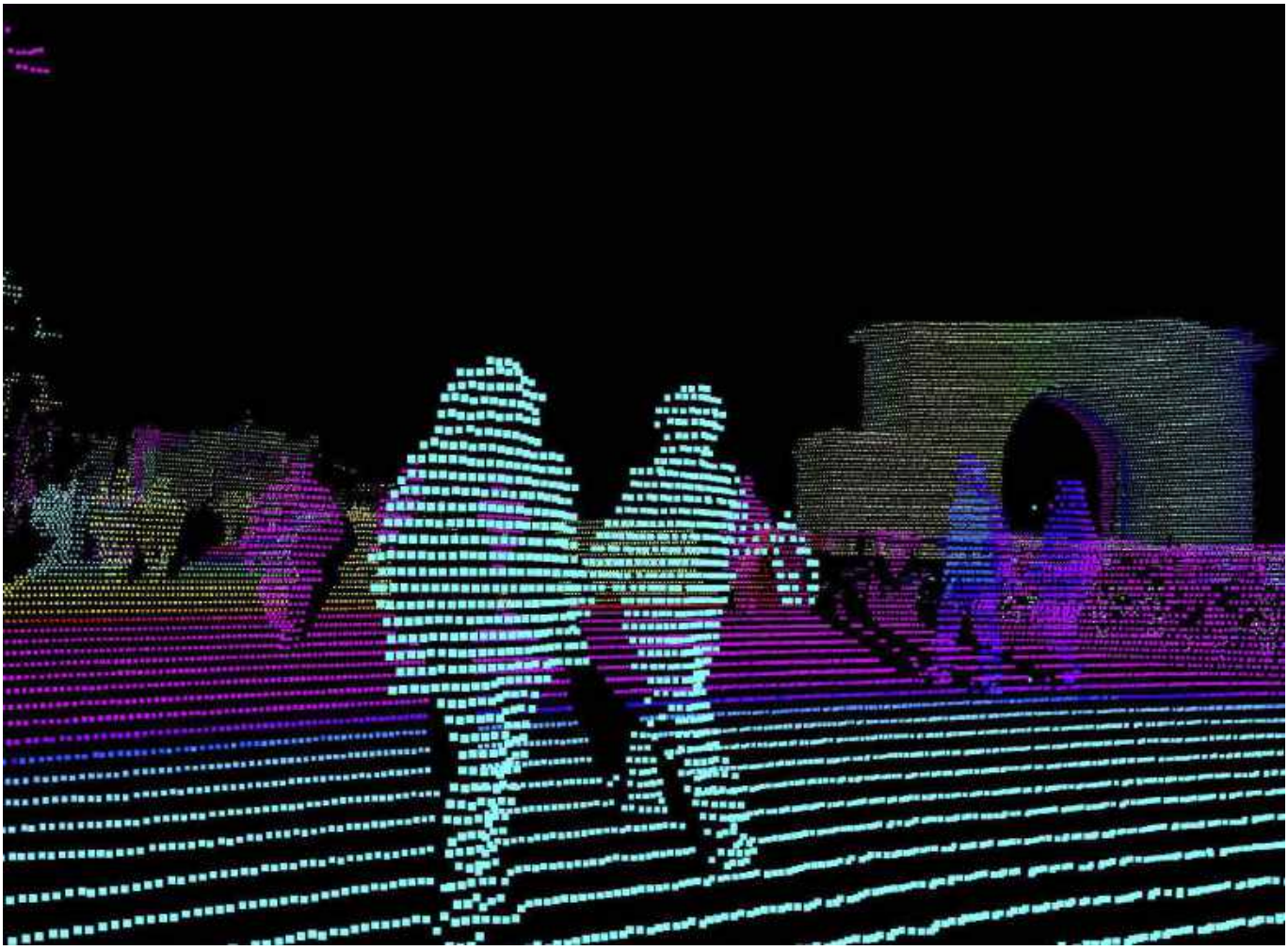
Nikodem Czechowski, EP

Źródła:

- https://bit.ly/2FwKY3J
- https://bit.ly/2STIuzm

Chcesz czytać nasze najnowsze artykuły jeszcze przed wydrukowaniem w EP?
Zajrzyj na
www.ep.com.pl/EPwtoku

eprasa.pl 85168ce91e



Oczy robota

Postrzeganie świata przez maszyny autonomiczne

Świadomość otoczenia jest kluczowym elementem, prowadzącym do coraz bardziej autonomicznych i elastycznych robotów w przemyśle i nie tylko. Świadomość tę dają robotom różnego rodzaju sensory, pozwalające im obserwować otoczenie. Stosowanie i rozwijanie tych sensorów jest jedyną drogą do bezpiecznej współpracy maszyn i ludzi w przemyśle.

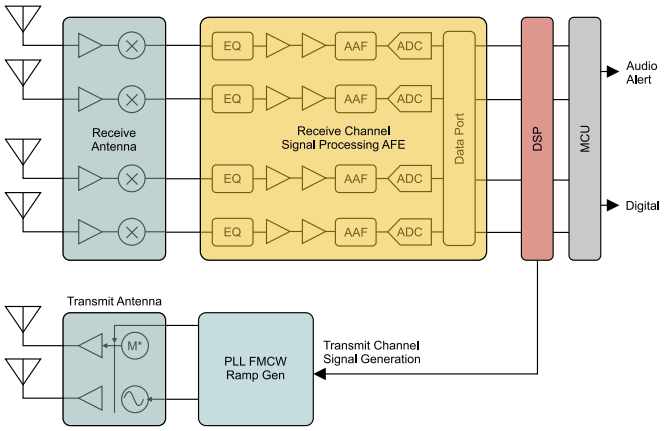
Aby robot mógł poruszać się w zmieniającym się dynamicznie środowisku, musi mieć możliwość obserwacji tego środowiska. Ludzie realizują ten cel przede wszystkim za pomocą zmysłu wzroku – patrzymy na świat widzeniem stereoskopowym, co pozwala nam nie tylko dostrzegać otaczające nas przedmioty i innych ludzi, ale także lokalizować je w trójwymiarowej przestrzeni. Aby roboty mogły osiągnąć podobną świadomość otoczenia, wymagają zastosowania różnych sensorów i czujników.

Fabryki przyszłości wypełnione będą współpracującymi ze sobą ludźmi i maszynami, w postaci robotów przemysłowych, obrabiarek numerycznych i autonomicznych pojazdów transportowych. Dla każdego z tych urządzeń percepcja głębi i możliwość rozpoznawania widzianych przedmiotów to kluczowe umiejętności, zwłaszcza, gdy mówimy o współpracy z człowiekiem. O ile maszyny nie mają obecnie większego problemu we współpracy ze sobą, o tyle człowiek ze swoimi chaotycznymi i czasami nieprzewidywalnymi ruchami jest dla nich problemem.

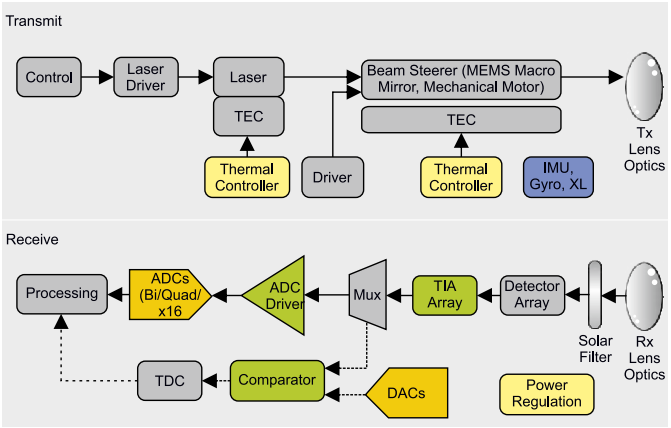
Robot przemysłowy porusza się zaprogramowanymi wcześniej trajektoriami ruchu. Drugi robot bez problemu może wiedzieć, gdzie ten pierwszy będzie się znajdował. Nawet jeżeli oba systemy są w jakimś stopniu autonomiczne, to mogą się wymieniać danymi w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Dzięki temu potrafią uniknąć takich zdarzeń, jak np. kolizja ramion. Człowiek nie porusza się po ustalonej trajektorii ani też nie jest w stanie cyfrowo przesłać informacji o tym, gdzie zamierza postawić kolejny krok. Na dodatek, jak wszyscy dobrze wiemy, ludzie nie panują w 100% nad swoimi ruchami. Każdemu z nas zdarzyło się upaść – to samo w sobie jest niebezpieczne, ale w sąsiedztwie szybko poruszających się autonomicznych maszyn może być przyczyną nawet śmiertelnego wypadku.

Percepcja głębi jest kluczowym aspektem dla świadomości otoczenia przez robota. To, co człowiek uzyskuje dzięki widzeniu obuocznemu, roboty mogą osiągać różnymi metodami. W dalszej części artykułu omówimy szereg technologii, pozwalających na percepcję głębi w systemach elektronicznych. Oprócz nawigacji, w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu, systemy te wykorzystywane

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 1. Schemat blokowy przykładowego systemu radaru mikrofalowego



Rysunek 3. Schemat blokowy typowego układu LIDARa (Analog Devices)

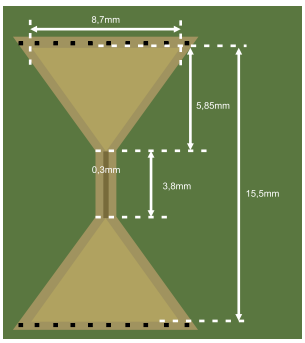
są także do skanowania trójwymiarowego czy zarządzania magazynami. Wiele tych systemów znajduje zastosowanie także poza przemysłem, na przykład w autach autonomicznych – one też są pewnego rodzaju robotami. Dzięki postępowi, systemy te oferują coraz większą precyzję i możliwość pracy w trudnych, przemysłowych warunkach.

Radary mikrofalowe

Systemy radiowego wykrywania obiektów i pomiaru odległości wykorzystują transmisję i odbiór fal radiowych do określania odległości, prędkości i kąta poruszania się obiektów w ich polu widzenia. Radar ma bogatą, 75-letnią historię i jest integralną częścią wielu technologii stosowanych m.in. w lotnictwie i obronności, automatyzacji przemysłowej i nie tylko. Współczesne radary, stosowane w robotyce, działają w paśmie fal milimetrowych. Typowym pasmem jest np. 24 GHz, stosowane w inteligentnej infrastrukturze miejskiej czy pojazdach autonomicznych.

Typowy radar mikrofalowy to wielokanałowy system akwizycji, składający się z jednego lub więcej torów nadawczych (Tx) i wielu torów odbiorczych (Rx). Na **rysunku 1** pokazano architekturę typowego systemu radaru mikrofalowego. Każdy z torów odbiorczych składa się z odbiornika mikrofalowego, gdzie znajduje się wzmacniacz niskoszumowy i konwerter częstotliwości, który redukuje częstotliwość sygnału z 24 GHz do niższej wartości, na ogół nie wyższy niż kilka megaherców. Sygnał ten przekazywany jest do front-endu analogowego, gdzie znajdują się filtry pasmowe, wzmacniacze i filtry antyaliasingowe, na końcu których wpięty jest przetwornik analogowo-cyfrowy, który digitalizuje sygnał i przekazuje go do wspólnego dla wszystkich kanałów odbiorczych procesora sygnałowego (DSP).

Radary mikrofalowe wykorzystuje się do analizowania i obrazowania przestrzeni. Dzięki możliwości integracji anten mikrofalowych na PCB (**rysunek 2**) systemy radarowe tego rodzaju mogą być bardzo małe. Istnieje ponadto szereg gotowych układów RF, które integrują w sobie wszystkie potrzebne elementy, do budowy tego rodzaju radaru. Komunikują się z wykorzystaniem typowych interfejsów cyfrowych, co ułatwia ich integrację z dowolnym procesorem aplikacyjnym w systemie.



Rysunek 2. Przykładowa antena radaru mikrofalowego firmy Vayyar (System Plus Consulting, https://bit.ly/3530qx4)

LIDAR-y

LIDAR to system, który mierzy czas przelotu impulsu światła, aby móc określić odległość między czujnikiem a obiektem. Zasada działania tego systemu jest bardzo prosta – układ emituje krótki impuls światła, najczęściej laserowego i czeka, aż odbije się od otoczenia. Odbite światło zbierane jest przez sensory wbudowane w układzie. LIDAR mierzy czas pomiędzy emisją impulsu a odebraniem odbitego światła. Znając prędkość światła – około 3×10^8 m/s, z czasu przelotu impulsu wyliczyć można odległość. Aby generować dane o relatywnie niewielkich odległościach, potrzebny jest niezwykle precyzyjny sprzęt – na pokonanie odległości jednego metra światło potrzebuje zaledwie ok. 3 nanosekund. Schemat budowy typowego systemu LIDAR pokazano na **rysunku 3**.

Aby utworzyć kompletne chmury punktów – mapę odległości – LIDAR musi próbkować w wielu kierunkach dookoła siebie. Aby możliwe było szybkie badanie całego środowiska, koniecznie jest wykorzystanie bardzo wysokiej częstotliwości próbkowania na poszczególnych emiterach i odbiornikach. Każdy z nich emituje dziesiątki lub setki tysięcy impulsów laserowych na sekundę. Oznacza to, że w ciągu 1 sekundy możliwe jest zbadanie odległości 100 tysięcy punktów. Duże systemy LIDAR mają wiele kanałów pomiarowych, złożonych z par nadajnik-odbiornik. Dzięki wielu kanałom system generuje ponad milion punktów danych na sekundę.

Jednak nawet wiele stacjonarnych kanałów to za mało, aby odwzorować całe otoczenie. Mogą one dać wystarczającą rozdzielczość, ale na niewielkim wycinku otoczenia. Aby było możliwe mapowanie całego środowiska, potrzeba ich dużo więcej. Niestety, zwiększanie liczby kanałów jest nieopłacalne i niepotrzebne zwiększa koszty systemu. Zamiast tego, wiele systemów LIDAR wykorzystuje obrotowe zespoły lub obracające się lustra, aby umożliwić kanałom omiatanie wiązkami całego otoczenia. Typowe strategie obejmują przechylanie każdego z emiterów i odbiorników powyżej lub poniżej poziomu, aby pokryć większą część środowiska w polu widzenia laserów. Na przykład 64-kanałowy system firmy Velodyne ma pionowe pole widzenia o kącie 26,8° i poziome pole widzenia równe pełnemu obrotowi. Dzięki temu z odległości 50 metrów LIDAR ten może zobaczyć szczyt obiektu o wysokości 12 metrów. Moduł pokazano na **fotografii 1**.

Fotografia 1. Moduł LIDAR firmy Velodyne

eprasa.pl 85168ce91e

LIDAR-y są obecnie jednymi z najszerzej stosowanych systemów do analizy otoczenia. Ich głównymi wadami jest złożoność mechaniczna układów skanujących, co przekłada się na ograniczenia parametrów, a także miejsc, gdzie można je stosować.

Systemy pomiaru czasu przelotu w 3D

Systemy trójwymiarowego pomiaru czasu przelotu (3D ToF) to rodzaj LIDAR-u bez mechanicznego skanera, który również wykorzystuje impulsy optyczne o czasie trwania rzędu nanosekund do zbierania informacji o głębi i przestrzeni (zwykle na krótkich dystansach).

Kamera ToF mierzy odległość, aktywnie oświetlając obiekt za pomocą modulowanego źródła światła, takiego jak laser i czujnik, który jest czuły na światło o długości fali używanego lasera. Sensor ten wychwytuje odbite światło i mierzy opóźnienie czasowe pomiędzy wyemitowaniem impulsu a odebraniem go przez macierz sensorów. Opóźnienie czasowe jest proporcjonalne do dwukrotności odległości między kamerą a obiektem, podobnie jak w przypadku LIDAR-u. Analogicznie, odległość tę można wyznaczyć, znając prędkość światła. Wystarczy znajomość czasu ΔT.

Istnieją różne metody pomiaru ΔT, z których dwie obecnie stały się najbardziej rozpowszechnione: metoda fali ciągłej (CW) i metoda impulsowa. Należy zauważyć, że zdecydowana większość systemów CW ToF, które zostały wdrożone i są obecnie na rynku, wykorzystuje czujniki CMOS, podczas gdy systemy impulsowe ToF wykorzystują czujniki inne niż CMOS (zazwyczaj macierze CCD). Na **rysunku 4** pokazano przykładowy schemat blokowy tego rodzaju urządzenia.

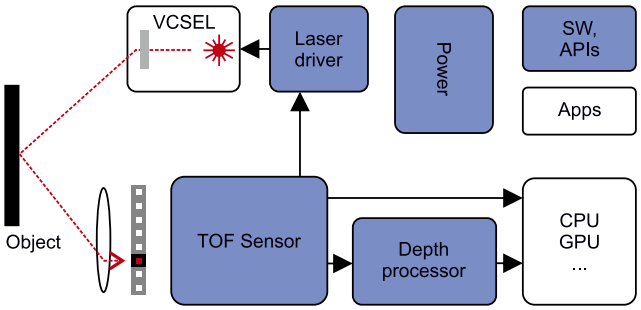
Kamery 3D ToF często łączone są z klasycznymi kamerami operującymi w pasmie widzialnym. Przykład takiego urządzenia pokazano na **fotografii 2**. Moduł ten jest oparty na torze sygnałowym 3D ToF oferowanym przez firmę Analog Devices. Integruje w sobie dwie matryce – głębi o rozdzielczości 640×480 oraz do obrazowania o rozdzielczości 1920×1080. Wbudowany w system procesor zapewnia fuzję i synchronizację obu obrazów, co pozwala na podgląd danych 3D w systemie. Moduł wyposażony jest w interfejs USB, pozwalający na komunikację z komputerami wbudowanymi itp.

Widzenie maszynowe

Ostatnim, wartym omówienia, systemem, zapewniającym robotom wzrok, są oczywiście kamery wizyjne. Nie są to jednak zwykłe kamery, tylko całe złożone systemy tzw. widzenia maszynowego. Definiuje się to jako zdolność urządzenia do postrzegania i rozumienia swojego otoczenia – na ogół w sposób podobny jak człowiek, ale kamery mogą wykrywać zakres długości fal znacznie szerszy niż w przypadku człowieka. W niektórych systemach widzenia maszynowego używa się systemów wizyjnych działających w zakresie podczerwieni, ultrafioletu czy nawet promieniowania rentgenowskiego.

Niezwykle istotnym elementem systemu widzenia maszynowego, oprócz samych sensorów obrazu, jest jego przetwarzanie. Termin widzenie maszynowe jest używany do określenia technologii, w której komputer nie tylko digitalizuje obraz, ale też go przetwarza i podejmuje określone działania na podstawie otrzymanych wniosków.

Współcześnie, do przetwarzania obrazów bardzo często stosuje się algorytm uczenia maszynowego, który jest elementem sztucznej inteligencji. Taki system jest w stanie ulepszać swoje działanie poprzez doświadczenia – zupełnie jak ludzie. Systemy widzenia maszynowego obecnie korzystają z algorytmów uczących się – dostarcza się im zestaw danych o tym, np. jak wygląda jakiś obiekt, aby były w stanie



Rysunek 4. Uproszczony schemat blokowy systemu 3D ToF (Analog Devices)

Fotografia 2. Kamera 3D ToF

go rozpoznawać na obrazie. Zaawansowane algorytmy widzenia maszynowego są w stanie rozpoznawać ludzi, zwierzęta, rowerzystów czy samochody na obrazie i śledzić ich ruch niemalże w czasie rzeczywistym. Systemy tego rodzaju często stosuje się obecnie w samochodach, także tych starających się o pewien stopień autonomii, do rozpoznawania otoczenia.

Oprócz obserwacji otoczenia systemy widzenia maszynowego mają obecnie kilka innych zastosowań. Używane są do wizualnej kontroli i zarządzania materiałami, pozwalają na odczyt kodów kreskowych czy ocenę produktów na różnych etapach procesu produkcji. Nawet producenci żywności i napojów stosują systemy wizyjne do monitorowania jakości. W medycynie systemy widzenia maszynowego są wykorzystywane w obrazowaniu medycznym i procedurach badawczych.

Podsumowanie

Na rynku jest obecnie dostępnych wiele systemów zapewniających robotom i innym systemom świadomość przestrzeni dookoła nich. W wielu rozwiązaniach stosuje się je wspólnie, łącząc je i wykorzystując tzw. fuzję sensorów do uzyskania optymalnych dla danej aplikacji rozwiązań.

Nikodem Czechowski, EP

Źródła:

- https://bit.ly/3lQrczG
- https://bit.ly/3j0lJEs
- https://bit.ly/3j4EuGO
- https://bit.ly/3j31fLc

http://forum.ep.com.pl

eprasa.pl 85168ce91e

Moduły inercyjne w robotyce

Naziemne systemy robotów często wykonują nudne, brudne i niebezpieczne zadania. Innymi słowy, często są używane przy czynnościach, w których bezpośrednie zaangażowanie ludzi jest zbyt kosztowne, zbyt niebezpieczne lub po prostu nieskuteczne. Oznacza to także, że roboty autonomiczne muszą orientować się w terenie równie dobrze, jak ludzie.

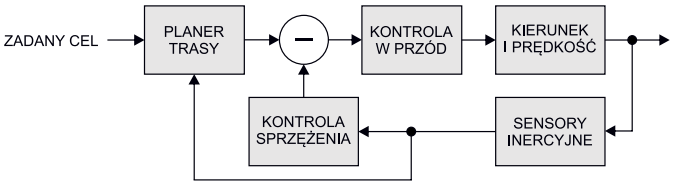
W wielu przypadkach istotną funkcją jest zdolność platform zrobotyzowanych do autonomicznej pracy. Do realizacji tego zadania stosowane są systemy nawigacji oraz monitorowania i kontrolowania ruchu pojazdów podczas przemieszczania się z jednego miejsca do drugiego. Dokładność w zarządzaniu pozycją i ruchem jest kluczową kwestią, umożliwiającą realnie użyteczną autonomię robota. Elementy takie jak żyroskopy MEMS (system mikroelektromechaniczny) zapewniają mechanizm pomiaru ruchu dla sprzężenia zwrotnego, który może być przydatny w optymalizacji pracy systemu nawigacji. System robota Seekur firmy Adept MobileRobots, pokazany na tytułowym rysunku, jest przykładem systemu autonomicznego, który wykorzystuje zaawansowane urządzenia MEMS w celu poprawy wydajności nawigacji.

Przegląd metod nawigacji robotów

Ruch robota zwykle rozpoczyna się żądaniem zmiany pozycji, wysłanym z centralnego procesora, który zarządza postępem w realizacji całej misji maszyny. System nawigacji rozpoczyna wykonywanie żądania zmiany pozycji, opracowując plan podróży lub jej trajektorię. Plan podróży uwzględnia dostępne ścieżki, znane lokalizacje przeszkód, możliwości robota i wszelkie istotne uwarunkowania danego zadania. Przykładowo, w przypadku pracy w szpitalu, krytyczny może być czas dostarczania leków czy odbierania próbek.

Plan podróży jest podawany do sterownika, który generuje profile jazdy i kierunku do sterowania nawigacyjnego. Profile powodują ruch systemu i postęp w realizacji planu. Ruch jest zazwyczaj monitorowany przez kilka systemów czujnikowych, z których każdy generuje osobne sygnały dla pętli sprzężenia zwrotnego. Kontroler sprzężenia zwrotnego łączy je ze sobą (tzw. fuzja sensoryczna) i aktualizuje plany podróży oraz jej warunki. Na **rysunku 1** pokazano podstawowy, uogólniony schemat blokowy systemu nawigacji.

Kluczowe kroki w tworzeniu systemu nawigacji rozpoczynają się od zrozumienia każdej z jego funkcji, ze szczególnym naciskiem na cele operacyjne i ograniczenia. Każda funkcja ma zazwyczaj jasno

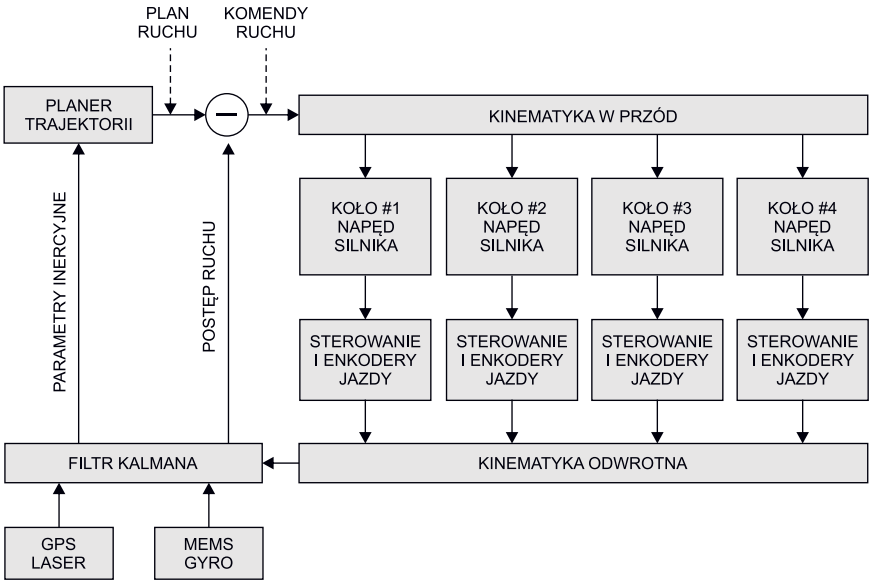


Rysunek 1. Uogólniony schemat typowego systemu nawigacji

eprasa.pl 85168ce91e

zdefiniowane i łatwe do wykonania aspekty, ale oferuje również pewne ostre ograniczenia, którymi należy w odpowiedni sposób zarządzać. W niektórych przypadkach proces ten może mieć charakter iteracyjny, gdzie identyfikacja i radzenie sobie z ograniczeniami otwiera nowe możliwości optymalizacji.

Najlepszym sposobem opisania procesu projektowania i optymalizacji systemu zarządzania ruchem w robocie, korzystającym z nawigacji inercyjnej, jest rzeczywisty przykład. Przyjrzyjmy się platformie robotycznej Seekur, stworzonej przez firmę Adept MobileRobots.



Rysunek 2. System nawigacji Adept MobileRobots Seekur

Adept MobileRobots Seekur

Jest to autonomiczny robot, który wykorzystuje system nawigacji inercyjnej (INS), podobny do pokazanego na **rysunku 2**. Robot ten ma napęd na 4 koła, z niezależnym sterowaniem i kontrolą prędkości dla każdego z nich, co zapewnia elastyczność przesuwania swojej platformy w dowolnym kierunku poziomym. Zdolność ta jest istotna w przypadku pojazdów zrobotyzowanych, szczególnie w nowo powstających zastosowaniach, jak systemy magazynowania, dostarczania próbek/materiałów do szpitali oraz systemy militarne.

Roboty ze sprzężeniem zwrotnym w przód

Sygnały pochodzące z „ciała" robota – główne sygnały błędów pozycji – reprezentują różnicę między planem podróży, dostarczanym przez system odpowiedzialny za planowanie trajektorii, a aktualizacjami postępu podróży, generowanymi przez system sprzężenia zwrotnego, mierzącego ruch układu. Sygnały są wprowadzane do systemu kinematyki odwrotnej, który przekłada polecenia ciała robota na profile sterowania i prędkości dla każdego koła. Profile są obliczane przy użyciu tzw. zasady (zależności) Ackermanna, które obejmują średnicę opony, powierzchnię jej styku, rozstaw kół i inne ważne cechy geometryczne robota. Definiuje ona kąty skręcania kół w jeździe po zadanej krzywiźnie, bez poślizgu kół.

Zasady i relacje sterowania Ackermanna umożliwiają platformom tworzenie elektronicznie połączonych profili kąta skrętu, podobnych do stosowanych w samochodach mechanicznych układów zębatkowych, znajdujących się w systemach kierowniczych. Zdalne uwzględnianie tych zależności, bez konieczności mechanicznego łączenia osi, pomaga zminimalizować tarcie i poślizg opon, zapewnia korzyści w postaci zmniejszonego ich zużycia czy redukcji strat energii oraz umożliwia ruch niemożliwy przy użyciu prostych połączeń mechanicznych.

System sterowania kołami

Każde koło ma własny wał napędowy, który jest mechanicznie połączony z silnikiem napędowym przez skrzynię biegów i – poprzez inną skrzynię biegów – z enkoderem optycznym, który jest wejściem do systemu sprzężenia zwrotnego systemu odometrii. Wał kierowniczy łączy oś z innym serwomotorem, który ustala kąt skrętu koła, jest również sprzężony z drugim optycznym enkoderem poprzez skrzynię biegów – co zapewnia kolejne wejście do systemu sprzężenia zwrotnego i odometrii.

Kontrola i sprzężenie zwrotne

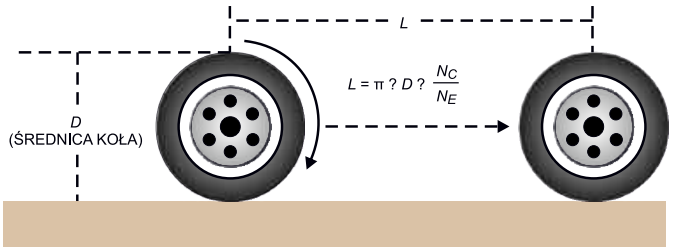
System nawigacji wykorzystuje rozszerzony filtr Kalmana do oszacowania pozycji robota na mapie poprzez połączenie danych z wielu czujników. Dane odometryczne w Seekur pochodzą z enkoderów trakcji koła i sterowania, co dzięki odometrii udostępnia informacje dotyczące translacji robota w terenie, oraz z żyroskopu MEMS, który przekazuje informacje na temat jego obrotu.

Odometria

System sprzężenia zwrotnego, z wykorzystaniem odometrii, szacuje pozycję kurs i prędkość robota przy użyciu optycznych enkoderów, służących do pomiarów obrotów wału napędowego i kierownicy. W enkoderach optycznych przezroczysty dysk blokuje zadrukowanymi polami wewnętrzne źródło światła, powodując, że światło jest modulowane w czasie ruchu osi. Kiedy dysk obraca się, wytwarza serię impulsów elektrycznych, które są zwykle podawane do obwodu licznika w kontrolerze ruchu. Liczba zliczeń enkodera na obrót jest równa liczbie szczelin w dysku, co pozwala na obliczenie liczby obrotów (w tym ułamkowych), na podstawie liczby impulsów obwodu enkodera. Na **rysunku 3** pokazano graficzne wyjaśnienie zależności, wykorzystywanej do przeliczania liczby obrotów wału napędowego na zmiany przemieszczenia liniowego (położenia) robota.

Pomiary z enkodera umieszczonego na osi napędowej i wale kierowniczym dla każdego koła są łączone w procesorze kinematyki, przy użyciu wzorów sterowania Ackermanna, które generują informacje na temat kursu, prędkości skrętu, położenia i prędkości liniowej maszyny. Zaletą tego rodzaju układu pomiarowego jest to, że czujniki są bezpośrednio sprzężone z układami napędowymi i sterującymi, dzięki czemu ich stan jest dokładnie znany. Jednak dokładność w zakresie rzeczywistej prędkości i kierunku pojazdu jest ograniczona, chyba że dostępne jest odniesienie do zestawu rzeczywistych współrzędnych.

Podstawowymi ograniczeniami lub źródłami błędów są spójność geometrii opony (dokładność i zmienność parametru D na rysunku 3) oraz występujące przerwy w kontakcie opony z nawierzchnią. Geometria opony zależy od konstrukcji bieżnika, ciśnienia i temperatury powietrza, wagi opony i robota, czyli wszystkich warunków, które mogą ulec zmianie podczas normalnego użytkowania. Poślizg opony, jaki może wystąpić, zależy m.in. od promienia skrętu, prędkości i rodzaju nawierzchni.



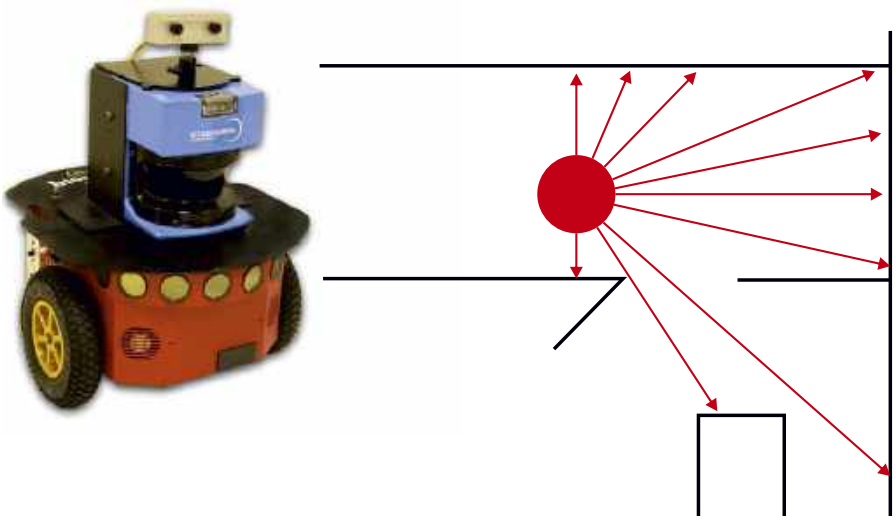
N_C = LICZBA IMPULSÓW ENKODERA NA OBRÓT
N_E = LICZBA IMPULSÓW ENKODERA ODCZYTANA PRZED KINEMATYKĘ ODWROTNĄ

Rysunek 3. Zależność liniowa przemieszczenia od odometrii kół

eprasa.pl 85168ce91e

Pomiar pozycji

System Seekur wykorzystuje różne czujniki do pomiaru odległości. Wewnątrz budynków stosuje skaner laserowy o polu skanowania 270° do tworzenia mapy otoczenia. System laserowy mierzy kształty, rozmiary i odległość obiektów od źródła lasera, mierząc odbijane światło i czas powrotu sygnału. W trybie mapowania robot charakteryzuje swój obszar roboczy, łącząc wyniki skanowania terenu z wielu różnych pozycji w obszarze roboczym (**rysunek 4**). W ten sposób robot tworzy mapę lokalizacji, rozmiarów i kształtów obiektów, która jest używana jako odniesienie sterowania ruchem w czasie wykonywania. W połączeniu z informacjami z mapowania laserowego, uzyskujemy dokładne informacje o pozycji robota względem środowiska. System ma wady, szczególnie gdy używany jest samodzielnie. Ograniczenia obejmują wydłużony czas skanowania i niezdolność do zarządzania zmieniającym się środowiskiem – monitorowania pomieszczenia w trybie ciągłym. W środowisku magazynowym ludzie, wózki podnośnikowe, podnośniki paletowe i wiele innych obiektów często zmieniają swoje położenie, co może potencjalnie wpływać na prędkość ruchu robota do celu, a nawet dokładność w osiągnięciu właściwego miejsca docelowego.



Rysunek 4. Laserowe mapowanie otoczenia

Do pomiarów pozycji w zastosowaniach zewnętrznych Seekur wykorzystuje globalny system pozycjonowania satelitarnego – GPS (**rysunek 5**). System wykorzystuje pomiar czasu przelotu sygnałów radiowych z co najmniej czterech satelitów do wyznaczania pozycji na powierzchni Ziemi. Jeśli są one dostępne, zapewniają poziomy dokładności pomiaru do 1 m. Rozwiązanie to ograniczają wymagania dotyczące widoczności satelitów, co może być utrudnione przez budynki, drzewa, mosty, tunele i wiele innych typów obiektów.

W niektórych przypadkach, gdy znane są lokalizacje i cechy charakterystyczne obiektów znajdujących się na zewnątrz (tzw. kaniony miejskie), radar i sonar mogą być używane do uzupełnienia szacunków pozycji robota podczas przerw w działaniu GPS. Mimo to, skuteczność takiego rozwiązania jest często ograniczona, szczególnie gdy istnieją dynamiczne utrudnienia, takie jak przejeżdżające samochody itp.

Sensory kąta MEMS

Żyroskopy MEMS, używane w robotach Seekur, zapewniają bezpośredni pomiar prędkości obrotowej wokół osi prostopadłej do powierzchni Ziemi. Oś jest podstawą układu odniesienia robota. **Równanie 1** opisuje zależność wiążącą zmianę kąta w czasie od t_1 do t_2, z prędkością kątową ω.

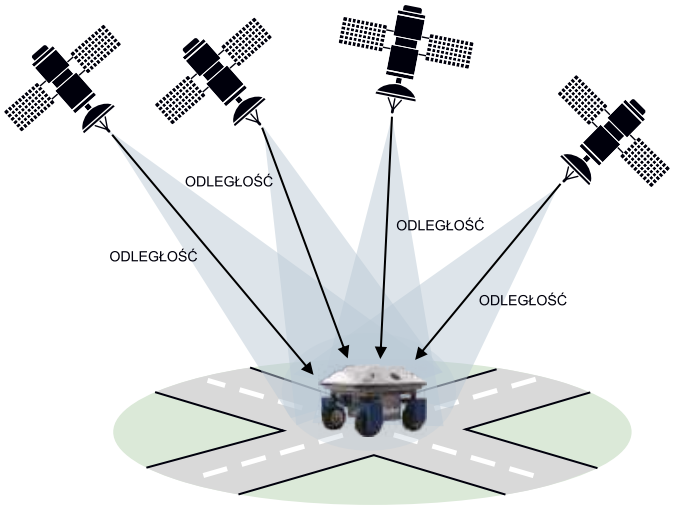
$$\theta_H = \int_{t_1}^{t_2} \omega \cdot dt \qquad (1)$$

Jedną z kluczowych zalet wykorzystywania tego podejścia jest fakt, iż żyroskop, jako że jest przyczepiony do fizycznej obudowy robota, śledzi fizyczną pozycję maszyny, a nie polega na przekładniach, kołach zębatych, enkoderach, etc. Dzięki temu na pomiar z żyroskopu nie mają wpływu luzy w mechanice i przeniesieniu napędu, geometria opon, problemy z przyczepnością itd.

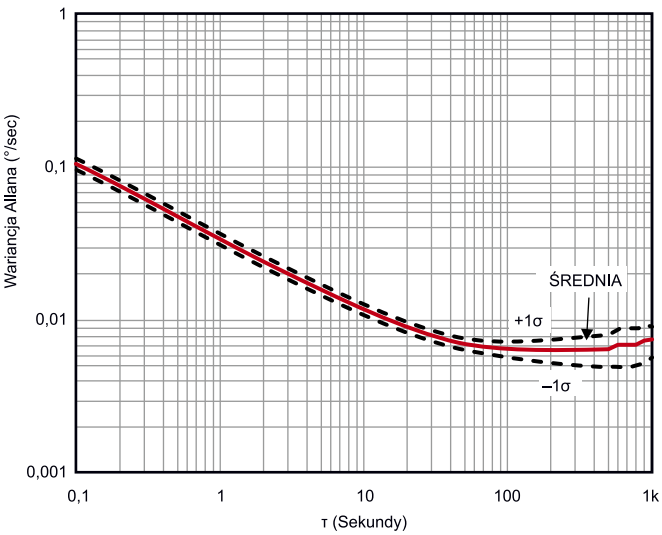
Z drugiej strony, precyzja pomiaru kąta opiera się na dokładności sensora, który podatny jest na problemy w zakresie pływania polaryzacji, braku stabilności długoterminowej, szumu i skończonej czułości. Przekłada się to na dryf pomiaru w czasie, co powoduje powstanie błędów pomiarowych, które opisać można jako ω_{BE}. Zmiana kąta, analogiczna jak w przypadku **równania 1,** opisana jest **równaniem 2**, które uwzględnia błąd.

$$\theta_H = \int_{t_1}^{t_2} (\omega + \omega_{BE}) \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} \omega \cdot dt + (t_2 - t_1) \cdot \omega_{BE} \qquad (2)$$

Błąd może być rozbity na dwie kategorie – błąd stały i błąd zależny od warunków otoczenia. Z pierwszym rodzajem błędów system Seekura radzi sobie, mierząc je, gdy wie, że nie jest w ruchu. Wymaga to od komputera nawigacyjnego informacji – kiedy nie są wydawane żadne polecenia przemieszczania się, co pozwala na zbieranie danych i aktualizację poprawek korygujących pomiary. Dokładność procesu uzależniona jest od poziomu szumu sensora i ilości czasu,



Rysunek 5. Pomiar pozycji za pomocą GPS



Rysunek 6. Krzywa wariancji Allana dla ADIS16265

eprasa.pl 85168ce91e

jaki przeznaczony jest na zbieranie danych pomiarowych oraz obliczanie współczynników korekcyjnych.

Miarą wiążącą dokładność estymacji błędu i czasu uśredniania jest krzywa wariancji Allana. Na **rysunku 6** pokazano przykładową krzywą tej wariancji dla układu MEMS z rodziny iSensor – ADIS16265. Wariancja Allana jest nazywana czasami wariancją dwupróbkową. Służy często do opisu czasowej stabilności częstotliwości zegarów, oscylatorów itp. Układ, którego dotyczy rysunek 6, podobny jest do żyroskopu MEMS, zainstalowanego w omawianym robocie. Projektantom Seekura udało się zminimalizować błąd do wartości poniżej 0,01°/s, uśredniając pomiar przez 20 sekund. Można to optymalizować jeszcze dalej i zbierać dane kalibrujące dłużej, przez nawet 100 s.

Wariancja Allana zapewnia również wgląd w optymalny czas całkowania (τ=τ2−τ1). Minimalny punkt krzywej jest zazwyczaj określany jako wstępna stabilność. Szacunki kursu są optymalizowane przez ustawienie czasu całkowania τ, równego czasowi całkowania skojarzonemu z minimalnym punktem krzywej wariancji Allana dla używanego żyroskopu.

Ponieważ wpływają na wydajność, błędy zależne od stanu, takie jak temperaturowy współczynnik odchylenia, mogą pozwolić na określenie – jak często robot musi się zatrzymywać, aby zaktualizować swoją korektę odchylenia. Korzystanie ze wstępnie skalibrowanych czujników może pomóc w rozwiązaniu problemu z najczęstszymi źródłami błędów, takimi jak zmiany temperatury czy napięcia zasilania.

Dla przykładu, zmiana z układu ADIS16060 na wstępnie, fabrycznie skalibrowany układ ADIS16265 może i zwiększa rozmiar, cenę oraz pobór mocy układu, ale zapewnia 18-krotnie lepszą stabilność w odniesieniu do temperatury. W przypadku zmiany temperatury o 2°C, maksymalne odchylenie wynosi 0,22°/s – w ADIS16060, natomiast spada zaledwie do 0,012°/s w przypadku skalibrowanego fabrycznie ADIS16265.

Źródło błędu czułości jest proporcjonalne do rzeczywistej zmiany kursu, jak pokazuje **równanie 3**.

$$\theta_H = \int_{t_1}^{t_2} (1+\varepsilon)\cdot\omega\cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} \omega\cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} \varepsilon\cdot\omega\cdot dt \qquad (3)$$

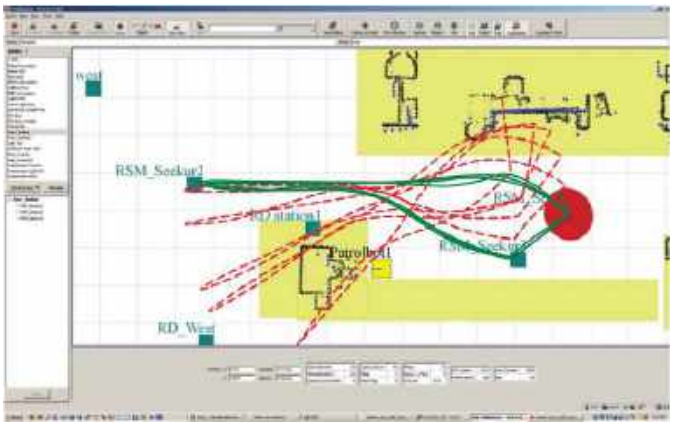
Komercyjne sensory MEMS często gromadzą informacje dotyczące błędów czułości. Najczęściej mieszczą się one w zakresie od ±5%, do nawet ±20%. Oznacza to, że system wymagać będzie każdorazowej kalibracji przed pierwszym uruchomieniem robota. Z kolei prekalibrowane żyroskopy MEMS, takie jak ADIS16265 lub ADIS16135, zapewniają błędy czułości na poziomie nieprzekraczającym ±1%, a da się je zmniejszyć jeszcze bardziej w ściśle kontrolowanym środowisku systemu.

Przykłady aplikacji

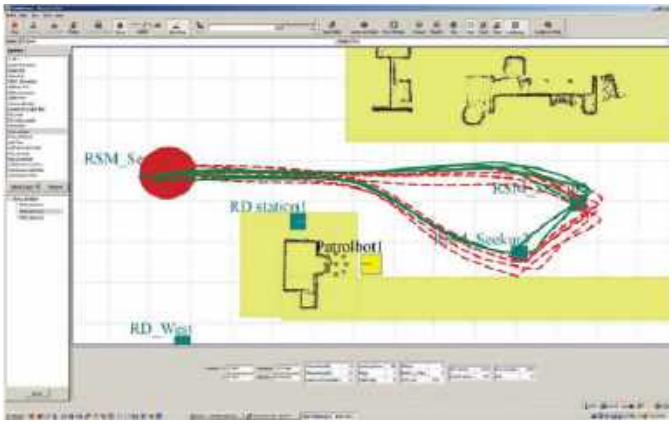
Automatyczne pozycjonowanie paczek w magazynie

Automatyka magazynowa wykorzystuje obecnie wózki podnośnikowe i systemy taśmociągów do przenoszenia materiałów, celem organizowania zapasów i realizacji innych operacji. Wózki podnośnikowe wymagają bezpośredniej kontroli człowieka, a system pasów wymaga regularnej konserwacji. Aby osiągnąć maksymalną ekonomię użytkowania magazynu, wiele z nich jest rekonfigurowanych, co otwiera drzwi dla autonomicznych platform robotycznych. Zamiast znacznych wysiłków konstrukcyjnych, w celu relokacji wózków podnośnikowych i systemów taśmociągów, flota robotów wymaga jedynie zmiany oprogramowania i ponownego przeszkolenia systemu nawigacji robota, aby magazyn był gotowy do zupełnie nowych zadań.

Kluczowym wymaganiem dotyczącym parametrów nawigacji inercyjnej w systemie dostaw magazynowych jest zdolność robota do utrzymania spójnej trajektorii ruchu i bezpiecznego manewrowania w dynamicznym środowisku, w którym poruszają się przeszkody, w tym i ludzie, których nie można narażać na niebezpieczeństwo.



Rysunek 7. Dokładność ścieżki Seekura – brak sprzężenia zwrotnego żyroskopu MEMS



Rysunek 8. Dokładność ścieżki Seekura, włączone sprzężenie zwrotne żyroskopu MEMS

Aby zademonstrować zalety wykorzystania sprzężenia zwrotnego z żyroskopu MEMS w tego typu zastosowaniach, Adept MobileRobots przeprowadziło eksperyment, aby dowiedzieć się, jak dobrze Seekur utrzyma powtarzalną ścieżkę, bez (**rysunek 7**) i z (**rysunek 8**) żyroskopowym systemem MEMS, w pętli sprzężenia zwrotnego. Należy zauważyć, że eksperyment przeprowadzono bez wykorzystania GPS lub korekcji wprowadzanych przez system skanowania laserowego. Eksperyment zrealizowano w celu zbadania wpływu żyroskopowego sprzężenia zwrotnego.

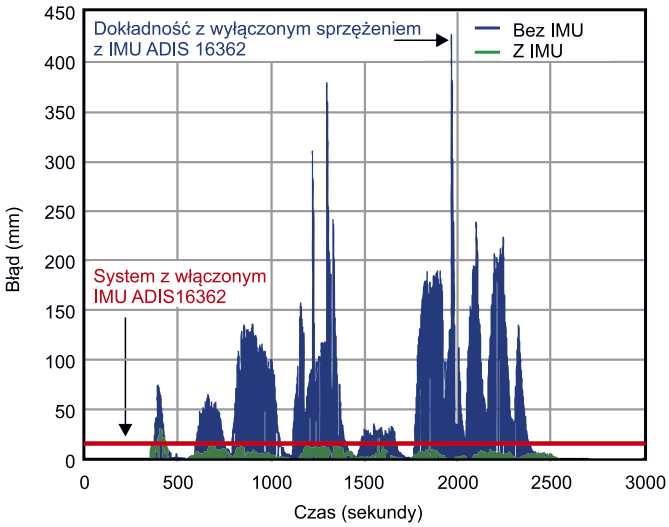
Różnica w utrzymywaniu dokładności toru jest łatwa do zauważenia przy porównaniu śladów toru na rysunku 7 oraz 8. Należy zaznaczyć, że eksperymenty przeprowadzono z wykorzystaniem elementów MEMS wczesnej generacji, która zapewniała stabilność na poziomie 0,02°/s. Współczesne żyroskopy umożliwiają dwu- lub nawet czterokrotną poprawę parametrów działania robota, przy tym samym koszcie, rozmiarze i poborze mocy. W miarę kontynuacji trendu, zdolność do utrzymywania dokładnej nawigacji na powtarzalnych ścieżkach będzie się poprawiać – otwierając dodatkowe rynki i zastosowania, takie jak dostawa próbek czy leków w szpitalach.

Konwoje dostawcze

Obecne inicjatywy amerykańskiej DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency – Agencja Zaawansowanych Projektów Badawczych w Obszarze Obronności) wymagają coraz nowszych robotów, które wykorzystywane są jako tzw. multiplikatory siły. Mają one zwielokrotnić siłę bojową ograniczonej liczby żołnierzy. Przykładem tego typu zastosowań robotów są konwoje zaopatrzeniowe, które są narażone na zagrożenie ze strony przeciwnika, szczególnie gdy są zmuszone do poruszania się w powolnym, przewidywalnym układzie.

Dokładna nawigacja umożliwia robotom, takim jak Seekur, przejmowanie większej odpowiedzialności za konwoje zaopatrzeniowe,

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 9. Błąd pozycji Seekura przy użyciu odometrii i IMU (zielone słupki) w porównaniu do wykorzystania tylko odometrii (niebieskie słupki)

zmniejszając narażenie ludzi na zagrożenia. Jedną ze szczególnych aplikacji, w przypadku której informacje zwrotne, pochodzące z żyroskopu MEMS, są szczególnie pomocne, jest sterowanie systemem w momencie, gdy wyłączony jest odbiornik GPS.

Aby sprawdzić, jak dobrze system lokalizuje Seekura, przeprowadzono porównanie jego działania – z IMU i bez niego. Zarejestrowano i przeanalizowano błąd ścieżki robota, co pokazuje **rysunek 9.** Błąd określono w odniesieniu do ścieżki, wyznaczonej przez GPS. Wykorzystana została tylko odometria (niebieski wykres) oraz odometria i IMU, połączone w filtrze Kalmana (zielony wykres). W drugim przypadku dokładność pozycjonowania była prawie 15-krotnie lepsza.

Podsumowanie

Twórcy platform robotycznych od dawna wiedzą już, że technologia żyroskopowa MEMS zapewnia ekonomiczne metody poprawy szacowania kierunku i ogólnej dokładności pomiaru ruchu ich systemów nawigacyjnych. Dostępność wstępnie skalibrowanych, gotowych do aplikacji w systemie urządzeń MEMS umożliwia prostą integrację funkcjonalną, co prowadzi do przyspieszenia rozwoju systemu i pozwala inżynierom skoncentrować się na jego optymalizacji.

Ponieważ technologia MEMS w dalszym ciągu poprawia swoje specyfikacje dotyczące szumu w systemie, stabilności i dokładności żyroskopów, będzie oferować coraz wyższy poziom dokładności i kontroli. Prawdopodobnie będzie otwierać kolejne nowe rynki dla platform robotów autonomicznych. Rozwój nowej generacji systemów, takich jak Seekur, mógłby przejść od żyroskopów, do w pełni zintegrowanych czujników MEMS IMU, z sześcioma stopniami swobody (lub więcej). Chociaż podejście zorientowane na odchylenie jest przydatne, to świat nie jest płaski. Wiele innych aplikacji, istniejących i przyszłych, może zawierać IMU MEMS do pełniejszego zarządzania ruchem w terenie i dodatkowego udoskonalania dokładności, z trzema żyroskopami umożliwiającymi pełną informację zwrotną i korektę pozycji systemu.

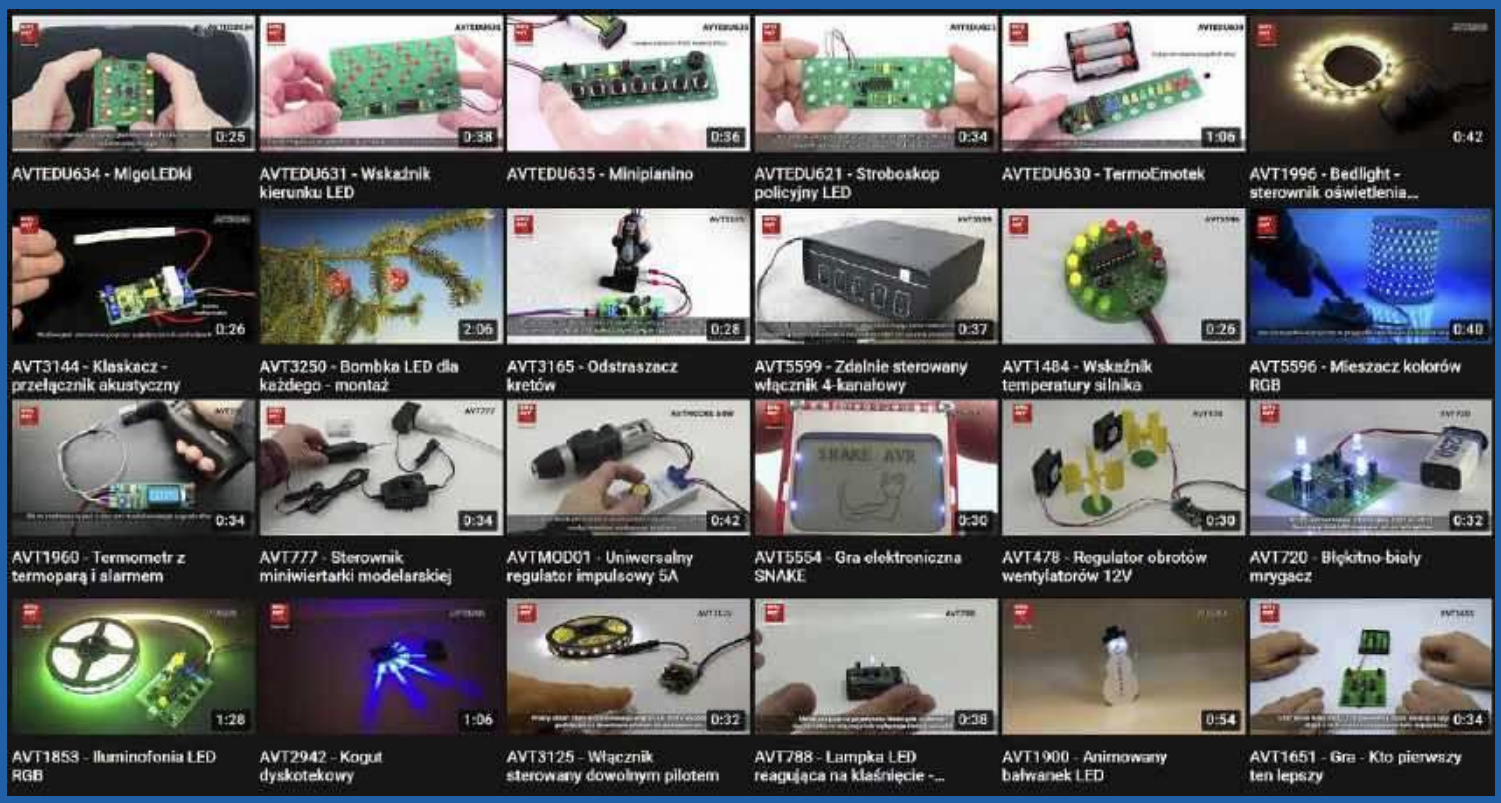
Nikodem Czechowski, EP

Źródło: https://bit.ly/3lWRU9X

REKLAMA

KITy AVT na wideo http://bit.ly/2ScLZTy

O KIT-ach AVT przeczytasz również na Facebooku http://bit.ly/2BjVMN7



eprasa.pl 85168ce91e

Łazik marsjański HAL-062

Projekt Koła Naukowego Robotyków KNR działającego przy Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej

Jednym z głównych projektów zrealizowanych przez Koło Naukowe Robotyków jest łazik marsjański HAL-062. Został zaprojektowany z myślą o starcie w międzynarodowych zawodach łazików marsjańskich, takich jak organizowane w USA URC (University Rover Challenge) czy też organizowany w Polsce ERC (European Rover Challenge). Wzorowany był na konstrukcjach obecnie stosowanych przez agencje kosmiczne.

Koło Naukowe Robotyków
POLITECHNIKA WARSZAWSKA

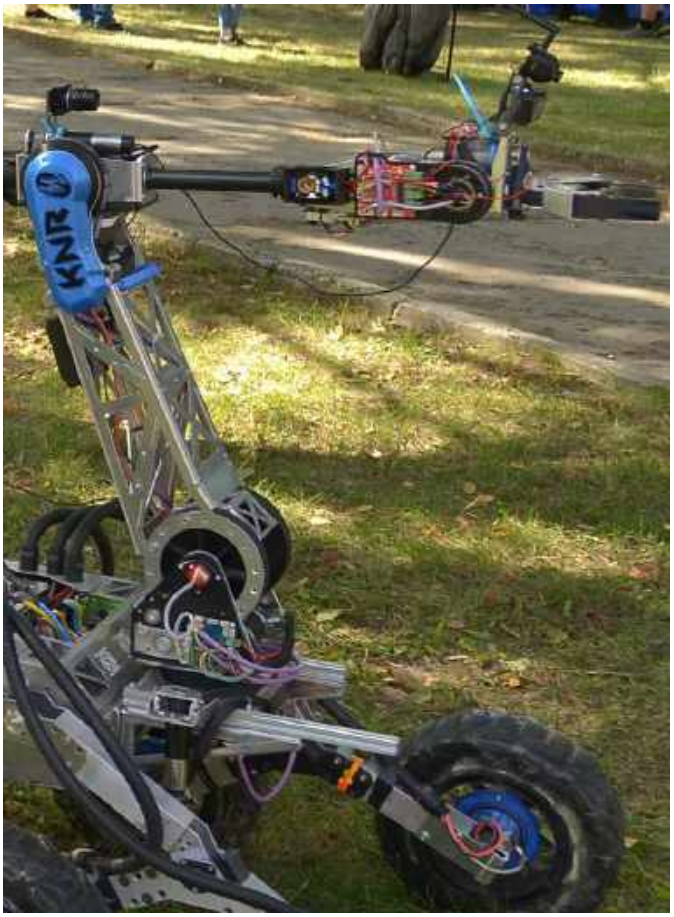
Łazik biorący udział we wspomnianych zawodach musi spełniać kilka warunków, m.in. jego waga powinna wynosić poniżej 50 kg, a wymiary nie powinny przekraczać 1,2×1,2 m. Ponadto musi mieć własne zasilanie bateryjne i umożliwiać zdalne sterowanie nawet przy braku bezpośredniej widoczności przez operatora.

Podczas zawodów łazik musi wykonać kilka różnych misji mających symulować pomoc astronaucie na obcej planecie, takich jak zbieranie rozrzuconych przedmiotów, przełączanie przycisków na panelu sterowniczym przy użyciu manipulatora czy też szukanie śladów życia. Do każdego z tych zadań pojazd musi być odpowiednio przygotowany, ponieważ wymaga użycia różnych narzędzi. Z tego powodu konstrukcja łazika jest modułowa i pozwala na szybką zmianę, pomiędzy zadaniami zamocowanego narzędzia. Zmianę, czyli demontaż jednego i montaż drugiego narzędzia, można przeprowadzić w czasie krótszym od 1 minuty. Całość zasilana jest z 3 wydajnych, równolegle połączonych akumulatorów Li-Po 4S o pojemności 20 Ah. Wygląd modułu zarządzającego zasilaniem pokazuje **fotografia 7**.

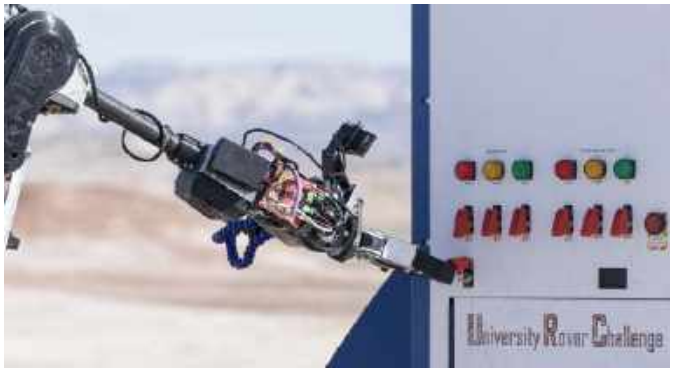
Budowa modułowa

Najważniejszym modułem jest część jezdna, której podstawą jest stabilne zawieszenie typu rocker-bogie. Taka konstrukcja perfekcyjnie nadaje się do jazdy w wymagającym terenie i jest z powodzeniem stosowana w łazikach jeżdżących po powierzchni Marsa. Na zawieszeniu został zamocowany kadłub, w którym mieści się cała elektronika

eprasa.pl 85168ce91e



Fotografia 1. Konstrukcja manipulatora

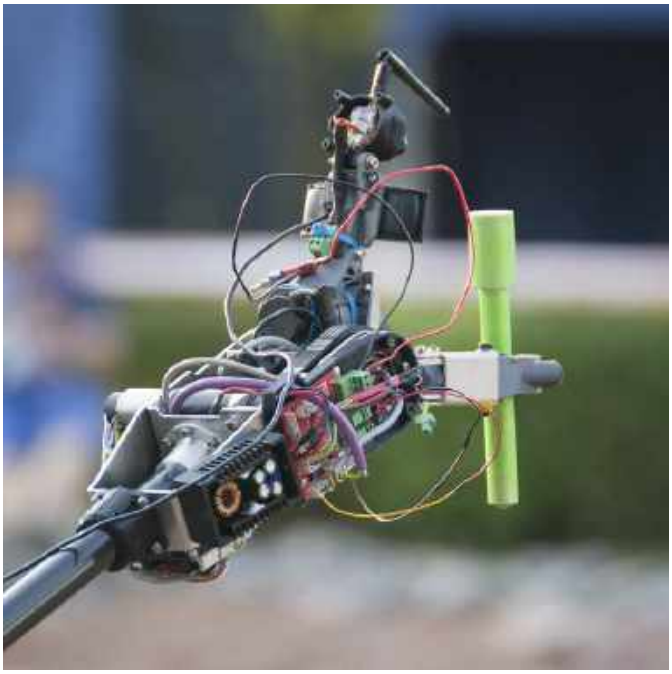


Fotografia 3. Działanie manipulatora na zawodach URC

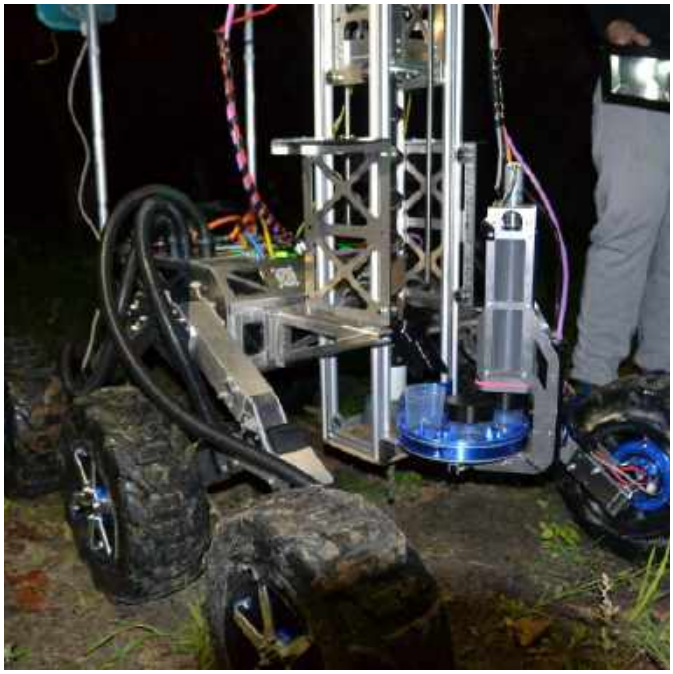
odpowiedzialna za sterowanie, komunikację i zasilanie łazika. Rolą kadłuba jest ochrona elektroniki przed ewentualnymi uszkodzeniami i warunkami zewnętrznymi, jak również zapewnienie stabilnego mocowania wszystkich podzespołów i modułów.

Modułem dość charakterystycznym dla łazików jest manipulator. Nasza konstrukcja ma 6 stopni swobody (**fotografia 1**). Na końcu manipulatora zamocowany został chwytak wykonany, m.in. w technologii druku 3D. Został zaprojektowany tak, aby z łatwością podnosić i manipulować dość precyzyjnie przedmiotami ważącymi do 6 kg.

Fotografia 4. Łazik z zamontowanym modułem laboratorium



Fotografia 2. Manipulator z zamontowanym chwytakiem i kamerami



Fotografia 5. Moduł laboratorium w trakcie testów

eprasa.pl 85168ce91e

W zależności od wykonywanej misji można swobodnie dobierać jego kształt i dodatkowy osprzęt (**fotografia 2, fotografia3**).

Kolejnym modułem jest laboratorium. Jego funkcjonalność zmienia się w zależności od wybranych zawodów (**fotografia 4**). Ogólnym zadaniem tej części jest pobranie próbki gleby i jej dalsze przebadanie – sfotografowanie, zważenie i sprawdzenie, czy w pobranej próbce są ślady życia. Wszystkie przyrządy potrzebne do wykonania misji powinny znajdować się na łaziku (**fotografia 5**). Czasami powoduje to konieczność wykonywania na pokładzie łazika różnych testów, w tym przeprowadzania reakcji chemicznych.

Ostatnim z używanych przez nas modułów jest moduł komunikacyjny składający się z masztu przymocowanego z tyłu łazika (**fotografia 6**). Jego głównym zadaniem jest podniesienie anten radiowych, aby poprawić komunikację z łazikiem w trudnym terenie. Zamocowane są na nim także lampy informujące o stanie pracy robota.

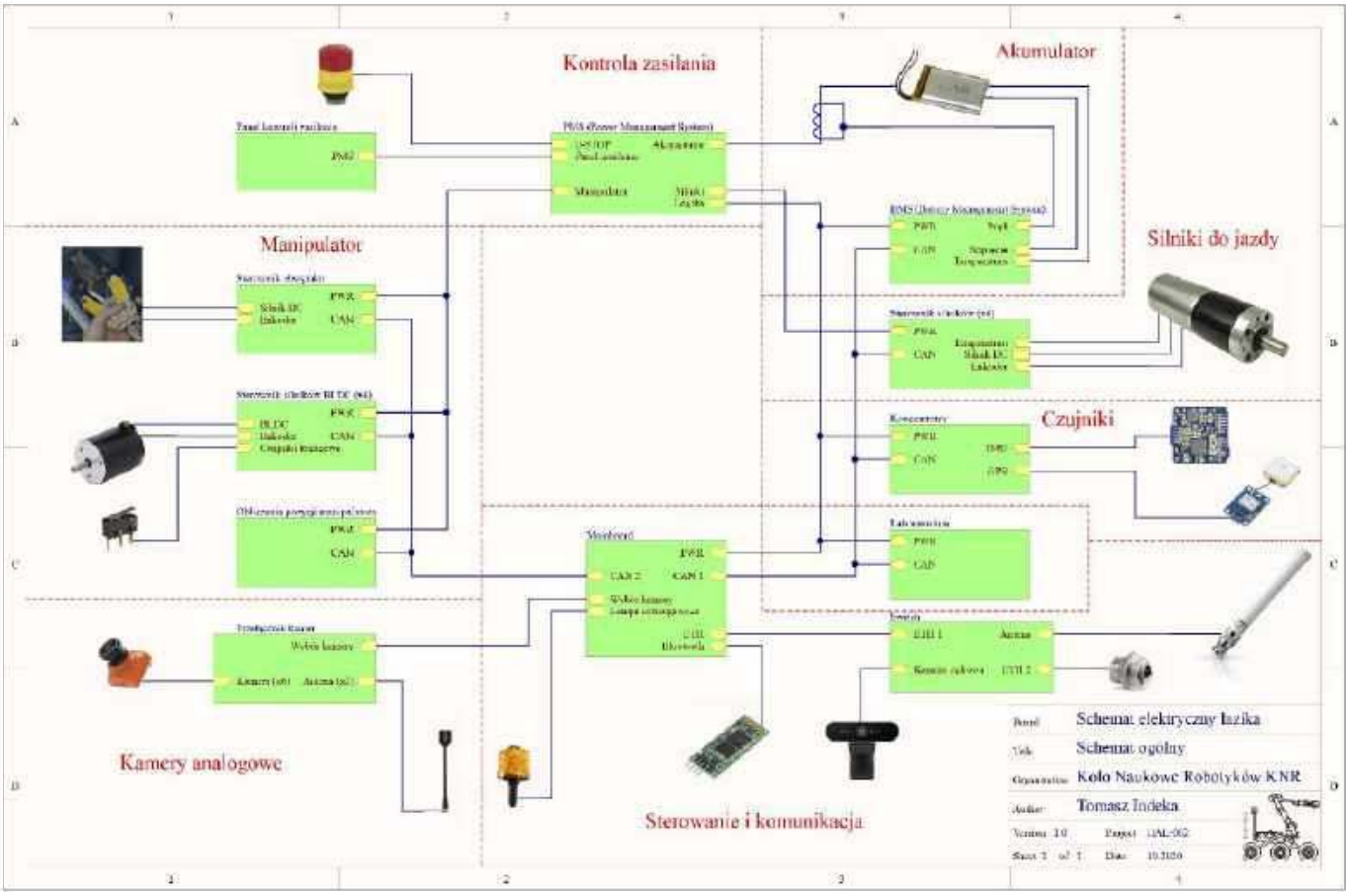
Do budowy pojazdu użyliśmy przede wszystkim elementów z giętej blachy ze stopu aluminium i elementów z tworzywa wykonanych w technologii druku 3D. Istotną cechą tych materiałów jest ich niewielki ciężar. Elementy z aluminium zostały użyte tam, gdzie są przenoszone większe siły lub występują większe powierzchnie. Dużym wsparciem w projektowaniu i wykonaniu elementów aluminiowych było wsparcie przedsiębiorstwa Addit. Technologia druku 3D jest uzupełnieniem dla mechaniki i doskonale nadaje się do tworzenia mniejszych mocowań i elementów trzymających. Jest również przydatna przy wykonywaniu dobrze dopasowanych, estetycznych i lekkich elementów ochronnych. Zarówno elementy aluminiowe, jak i te przeznaczone do wydruku 3D, zostały zaprojektowane przy użyciu oprogramowania SOLIDWORKS i sprawdzone pod kątem wytrzymałości dla danych obciążeń. Było to szczególnie ważne w przypadku elementów aluminiowych, które są trudniejsze i droższe w produkcji. Elementy z druku 3D są dla nas prostsze w wykonaniu dzięki użyciu prywatnych drukarek 3D i wsparciu firmy Finnotech.

Fotografia 6. Łazik z zamontowanym modułem komunikacyjnym na zawodach ERC

Napęd

Główne silniki odpowiadające za jazdę muszą mieć dużą moc i wytrzymywać spore obciążenia, aby łazik mógł się swobodnie poruszać. Dlatego do tego celu użyliśmy 6 silników DC o mocy 150 W z dołączaną przekładnią planetarną. W przyszłości bierzemy pod uwagę możliwość zastosowania w tym celu silników BLDC. Silniki zostały umieszczone bezpośrednio w kołach łazika w ich osiach obrotu. Dzięki temu zmniejszają się straty przeniesienia mocy, ponieważ nie ma pośredniczących przekładni pasowych, a ponadto konstrukcja jest bardzo kompaktowa. Dodatkowe mocowania silników wewnątrz kół zostały przez nas zaprojektowane i wykonane metodą druku 3D.

Do zasilania silników jezdnych, ze względu na ich znaczną moc, zastosowaliśmy gotowe sterowniki dostępne na rynku. Decyzja została podjęta po kilku próbach wykonania własnych sterowników, które w praktyce okazywały się zbyt zawodne. Na to nie mogliśmy



Rysunek 1. Uproszczony schemat całego systemu

eprasa.pl 85168ce91e

sobie pozwolić. Prędkość kół jest kontrolowana na podstawie danych z inkrementalnych enkoderów magnetycznych AS5045B zamocowanych wewnątrz przekładni silników. Dodatkowo silniki są zabezpieczone termicznie przez zastosowanie termistorów. Przy przekroczeniu ustalonego progu temperatury silników ich zasilanie jest odłączane, aby zapobiec przegrzaniu i uszkodzeniu.

W manipulatorze zastosowaliśmy jeden silnik na każdy stopień swobody. Naturalnym wyborem dla manipulatorów wydają się serwomechanizmy, umożliwiające sterowanie kątem obrotu osi. Niestety serwa dostępne na rynku, w większości przypadków, nie są w stanie przenosić zbyt dużych obciążeń. Natomiast obciążenia, które musi przenosić manipulator, to masa własna (aluminiowa konstrukcja) oraz obciążenie do 6 kg zawieszone na końcu manipulatora. Do silników, które mogą przenosić większe obciążenia i w których łatwo sterować kątem obrotu osi, należą także silniki krokowe. Jednak są one zbyt duże i ciężkie, aby można było je swobodnie umieścić na manipulatorze. Ostatecznie zastosowaliśmy wyspecjalizowane silniki BLDC z przekładniami, ponieważ dysponowały odpowiednią mocą i umożliwiły zredukowanie masy manipulatora. Możliwość ustawiania zadanych kątów na poszczególnych przegubach uzyskaliśmy dzięki zastosowaniu absolutnych enkoderów magnetycznych zamocowanych na osiach silników. Napęd silników jest przenoszony na mechanizm przegubów za pomocą pasków, ponieważ zamocowanie silników w osi obrotu przegubu było w większości przypadków niemożliwe. Paski dodatkowo pełnią funkcję przekładni redukcyjnych oraz sprzęgieł podatnych.

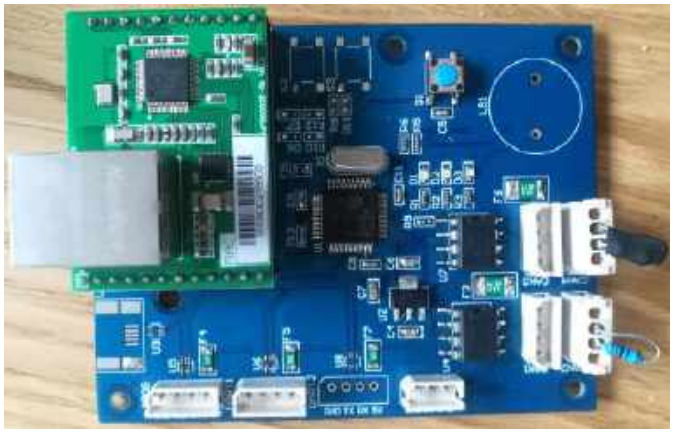
Sterowniki silników BLDC znajdujących się w manipulatorze zostały zakupione w formie modułów umieszczanych na własnych płytkach PCB. Zdecydowaliśmy się na takie rozwiązanie, aby mieć pewność co do sprawności i niezawodności sterowników. Dzięki temu zachowaliśmy niewielkie rozmiary sterowników, a sterowanie silnikami jest proste i intuicyjne. Podobnie jak w przypadku silników do jazdy, użyliśmy enkoderów magnetycznych, tym razem jednak wybraliśmy model AS5048A, który umożliwia wygodną komunikację poprzez interfejs SPI. Takie podejście pozwoliło nam zastosować jedną płytkę na każdy silnik w manipulatorze i zmniejszyć ilość potrzebnego okablowania, które aktualnie ogranicza się do przechodzącej przez całą konstrukcję wiązki składającej się z zasilania i magistrali CAN.

W przypadku konieczności wykorzystania silników o mniejszej mocy niż te w napędach (np. do obrotu kamery), używamy mniejszych silników DC. Do ich sterowania służą układy scalone typu MC34931, zintegrowane w naszej elektronice. Jest to rozwiązanie wystarczające dla mniejszych mocy i potwierdziło swoją niezawodność. Czasami, w zależności od potrzeb, we współpracy z silnikami jest używany enkoder magnetyczny w takiej samej konfiguracji, jak w przypadku silników używanych do jazdy.

Ostatnim typem zastosowanych silników są silniki krokowe mniejszych mocy, które zastosowaliśmy tam, gdzie wymagane było dokładne sterowanie pozycją, np. w module laboratorium. Sterowanie silnikami krokowymi odbywa się z naszej elektroniki, za pomocą driverów typu DRV8825, które zapewniają wygodne i elastyczne sterowanie.

Sterowanie i komunikacja wewnętrzna

System sterowania łazika, podobnie jak jego mechaniczna budowa, został rozbity na mniejsze, niezależne moduły, z których każdy odpowiada za wykonywanie własnego zadania. Uproszczony schemat systemu pokazuje **rysunek 1**. Moduły komunikują się ze sobą za pomocą wspólnej magistrali CAN. Zapewnia ona wysoką odporność na zakłócenia i jest magistralą typu multi-master, która pozwala nam na swobodną komunikację pomiędzy modułami. W systemie sterowania zastosowaliśmy dodatkową magistralę CAN, która obejmuje tylko manipulator. Komunikacja została rozdzielona, aby móc przesyłać informacje o kolejnych pozycjach manipulatora jak najszybciej i najpłynniej bez nadmiernego obciążania głównej magistrali komunikacyjnej. Doprowadziło to do praktycznie całkowitego wykorzystania możliwości magistrali CAN manipulatora.

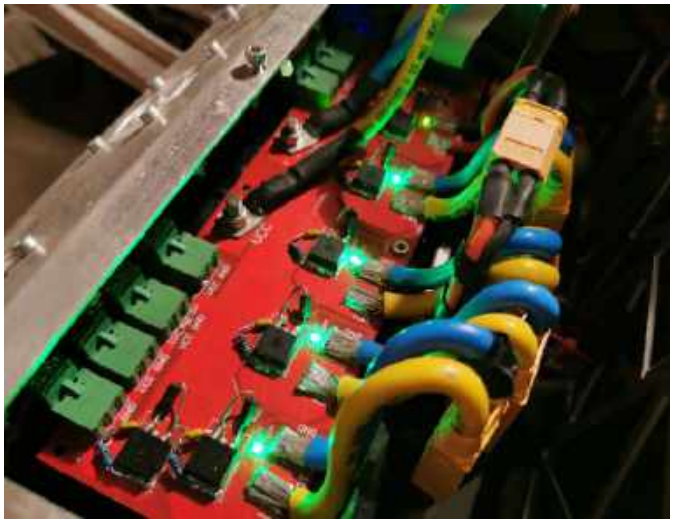


Fotografia 7. Wygląd modułu mainboard

Rozbicie sterowania na mniejsze moduły daje możliwość prostej i szybkiej wymiany poszczególnych części w razie awarii lub łatwą rozbudowę o kolejne moduły w przyszłości. Każdy z modułów oparty jest na mikrokontrolerze STMicroelectronics STM32 (serie F1, F4 i H7) i zawiera elektronikę przeznaczoną do spełniania swojego specyficznego zadania. W całym łaziku znajduje się kilkanaście mikrokontrolerów, z których każdy ma inne zadania. Poszczególne serie zostały wybrane tak, aby przed zmontowaniem elektroniki było możliwe pisanie kodu na płytki ewaluacyjne NUCLEO. Dzięki temu, w momencie otrzymania gotowej elektroniki, program był już napisany i wstępnie przetestowany.

Najważniejszym ze wszystkich modułów jest zarządzający całością mainboard (**fotografia 8**). Jego zadaniem jest organizacja komunikacji pomiędzy pozostałymi modułami oraz komunikacja z operatorem. Mainboard przekształca otrzymane od operatora komendy na odpowiednie polecenia wysyłane magistralą do poszczególnych podzespołów. Również zwraca operatorowi podstawowe dane telemetryczne łazika, takie jak napięcie na bateriach, położenie manipulatora itp. Do jego zadań należy też sterowanie kilkoma dodatkowymi układami, które są na tyle proste, że nie potrzebują osobnych sterowników, np. lampy ostrzegawcze lub wybór źródła obrazu przesyłanego z kamer.

Programy mikrokontrolerów napisaliśmy z wykorzystaniem narzędzi i bibliotek udostępnionych przez STMicroelectronics. Do wstępnej konfiguracji portów wykorzystaliśmy narzędzie pomocnicze CubeMX, które znacznie ułatwia to zadanie. Jest ono też wykorzystywane na etapie projektowania elektroniki, ponieważ pozwala upewnić się, że wszystkie komponenty zostaną połączone z portami zdolnymi



Fotografia 8. Wygląd modułu zarządzającego zasilaniem PMS

eprasa.pl 85168ce91e

je obsłużyć. Podczas programowania szeroko wykorzystujemy bibliotekę wysokopoziomową HAL, również dostarczaną przez STMicroelectronics. Mimo że nie zapewnia ona najbardziej optymalnego wykorzystania mikrokontrolerów, to pozwala na szybkie prototypowanie, tworzenie i testowanie kodu. Środowisko, którego używamy, to przeważnie Atollic, ale z racji na mnogość istniejących rozwiązań nie jest jedynym IDE.

Dosyć ważną kwestią podczas projektowania elektroniki, poza jej modułową budową, było zabezpieczenie przed przypadkowymi błędami osób obsługujących. Dlatego każdy z modułów jest zabezpieczony na kilka najczęściej występujących przypadków:

- Zbyt duże obciążenie, zwarcie – najprostsze z zabezpieczeń, będące zwykłym bezpiecznikiem umieszczonym na każdym wejściu i wyjściu zasilania;
- Zbyt wysokie napięcie zasilania – wykonane w postaci transila dobranego odpowiednio do przewidzianego napięcia zasilania. W połączeniu z wymienionymi wyżej szybkimi bezpiecznikami stanowi dość skuteczne zabezpieczenie;
- Ochrona przed odwrotną polaryzacją zasilania – do realizacji tego zabezpieczenia został użyty tranzystor P-MOSFET dołączony na wejściu zasilania. Skutecznie chroni przed pomyłką w polaryzacji przewodów zasilających;
- Ochrona antystatyczna – do ochrony elektrostatycznej został użyty wyspecjalizowany układ umieszczony na liniach sygnałowych. Liniami, które szczególnie zasługiwały na zabezpieczenie, były linie doprowadzające sygnały z zewnątrz bezpośrednio do mikrokontrolera.

Wykonanie układów zabezpieczających, podobnie jak pozostałej elektroniki wymaga od nas dość sporej ilości komponentów. Przy tworzeniu układów elektronicznych dużym ułatwieniem była współpraca Koła Naukowego Robotyków z Transfer Multisort Elektronik. Dzięki TME mamy zapewnione dostawy materiałów i narzędzi niezbędnych w naszym warsztacie.

Komunikacja zewnętrzna

Komunikacja łazika z operatorem odbywa się przez fale radiowe w paśmie częstotliwości 2,4 GHz lub 5 GHz (zależnie od zawodów), czyli częstotliwościach standardowych dla sieci Wi-Fi. Używane przez nas anteny przemysłowe zapewniają nam efektywny zasięg do ponad 500 metrów w terenie bez przeszkód. W ten sposób przesyłane są komendy sterowania, informacje o stanie łazika, jak również obraz z kamery cyfrowej.

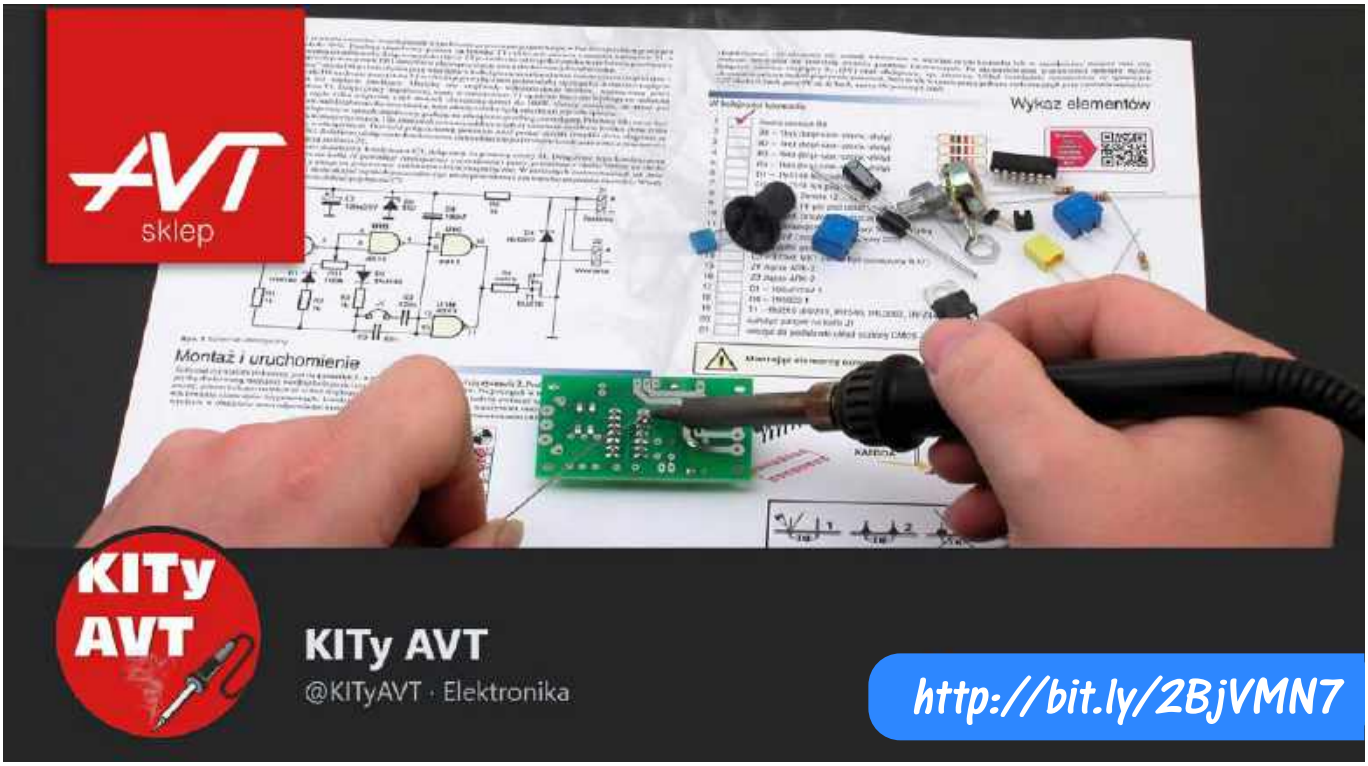
Ustawianie komunikacji poprzez fale radiowe jest jednak czasochłonne i wymaga montażu dość nieporęcznych masztów antenowych zarówno w bazie, jak i na łaziku, dlatego do testów i codziennej jazdy są używane prostsze rozwiązania. Główną alternatywą jest komunikacja przez kabel Ethernet. Zapewnia nam dokładnie te same możliwości co komunikacja radiowa, lecz nie wymaga od nas żadnej pracy przygotowawczej. Minusem jest oczywiście ograniczony zasięg przewodu, dlatego też zazwyczaj przy tej opcji do sterowania używamy laptopa. Drugą alternatywą jest sterowanie przez Bluetooth, które pozwala na sterowanie łazikiem za pomocą dowolnego urządzenia obsługującego ten standard. Specjalnie do tego celu opracowaliśmy wygodną w użyciu aplikację sterującą na telefon.

Obecnie projekt jest również wzbogacany o dodatkowe kamery analogowe, używane przez nas równolegle i niezależnie od istniejącej już konfiguracji. Główną zaletą kamer analogowych jest możliwość przesyłania informacji w innym paśmie niż standardowe Wi-Fi. Dostarczany obraz jest płynniejszy i ma mniejsze opóźnienia, jednak obecna konfiguracja ma gorszą jakość niż używana dotychczas kamera cyfrowa. Decyzja o wykorzystaniu kamer analogowych zapadła, gdy podczas jednych z zawodów opóźnienia transmisji danych cyfrowych były na tyle duże, że nie byliśmy w stanie sprawnie sterować łazikiem. Obecnie kamery cyfrowe są wciąż przez nas stosowane, ale w mniejszym zakresie – do przesyłania zdjęć wysokiej rozdzielczości. Do podglądu w czasie rzeczywistym korzystamy z kamer analogowych.

Obecnie przygotowujemy projekt do startu w zawodach URC, które planowane są na początek czerwca 2021. W tym celu dokonujemy dalszych usprawnień i ulepszeń naszego łazika. Dodane zostaną między innymi wymienione wyżej kamery analogowe, jak również odchudzony zostanie kadłub łazika.

Tomasz Indeka
indeka.tomasz@gmail.com
http://knr.meil.pw.edu.pl/

REKLAMA



eprasa.pl 85168ce91e

Ogłoszenia i reklamy hurtowni, sklepów, importerów, producentów, dealerów, itp. są płatne. Cena podstawowego modułu (35×20 mm) wynosi 66 zł + VAT. Koszt minimalnej ramki dla ogłoszeń o wielkości 3 modułów wynosi 198 zł + VAT. Moduły można łączyć zarówno w pionie jak i w poziomie. Maksymalna szerokość ogłoszenia to 5 modułów, wysokość 12 modułów. Rabaty stosujemy wyłącznie dla reklam powyżej 8 modułów: 4-6 emisji 10%, 7-11 emisji 15% i od 12 emisji 25%.

Oferta specjalna:

• publikacja fragmentów cennika w ramce o wielkości: 8 modułów w pionie cena 264 zł + VAT, 9 modułów w poziomie 305 zł + VAT

• rabat specjalny dla firm poszukujących pracowników wynosi 25% (wyłącznie dla dużych reklam).

Wszelkich informacji udziela **Grzegorz Krzykawski**, **tel. 22 257 84 60**, e-mail: **grzegorz.krzykawski@ep.com.pl**.

Reklamy do tej rubryki mogą być przygotowane przez Zamawiającego w CMYK, w formacie CDR (wersja do 2018), AI, EPS (tekst zmieniony na krzywe), PSD, PDF (programy Adobe w wersji do CC 2021 włącznie PC/Mac) z próbnym wydrukiem. Małe reklamy mogą być przygotowane w redakcji (gratis) na podstawie odręcznego szkicu. Opracowania te nie będą jednak wówczas uzgadniane z Zamawiającym przed oddaniem do druku.

Redakcja nie odpowiada za treść reklam i ogłoszeń zamieszczonych w Elektronice Praktycznej

www.ep.com.pl

NINIEJSZE OGŁOSZENIA SĄ INFORMACJĄ HANDLOWĄ I NIE STANOWIĄ OFERTY W MYŚL ART. 66, § 1 KODEKSU CYWILNEGO. EWENTUALNIE PODANE CENY MOGĄ ULEC ZMIANIE.

eprasa.pl 85168ce91e

Eksperymenty z FPGA (12)

Dyskretna transformata Fouriera

FTP
WSZYSTKIE POPRZEDNIE ODCINKI KURSU SĄ DOSTĘPNE NA STRONIE WWW.MEDIA.AVT.PL

Zanim połączymy bloki naszego układu FPGA w układ analizatora widma dźwięku, rozpoczniemy od teoretycznych podstaw dyskretnej transformaty Fouriera. Jest to konieczne dla dobrego zrozumienia tego trudnego zagadnienia.

Przed przystąpieniem do wykonywania eksperymentów, zachęcam do aktualizacji repozytorium z przykładami (poprzez wywołanie polecenia `git pull`) [1]. **Rysunek 1** pokazuje przykładowy sygnał analogowy. Został on spróbkowany w ośmiu, równo od siebie oddalonych punktach – są one zaznaczone na wykresie kropkami. Natomiast to, co zostaje z sygnału za przetwornikiem ADC, ilustruje **rysunek 2**. Na pierwszy rzut oka ciężko dopatrzeć się w pojedynczych punktach pierwotnego sygnału, ale jeżeli spełnione jest twierdzenie o próbkowaniu, to zawarta jest w nich pełna informacja o przebiegu ciągłym. Twierdzenie mówi o tym, że częstotliwość próbkowania musi być dwa razy większa niż szerokość pasma badanego sygnału.

Wrócimy jednak do naszych próbek, które możemy przedstawić jako wektor o długości N=8:

$$x = [1, -0.21, -1, -0.21, 1, 1.21, 1, 1.21]^T$$

W tym zapisie współczynniki odnoszą się do najprostszej bazy, składającej się z wektorów:

$$v = \left\{[1,0,0,0,0,0,0,0]^T, [0,1,0,0,0,0,0,0]^T, \ldots, [0,0,0,0,0,0,0,1]^T\right\}$$

Krócej możemy zapisać ją za pomocą delty Kronecker:

$$v_n^k = \delta(n-k) \qquad (1)$$

Gdzie $\boldsymbol{v^k}$ to kolejny wektor bazy, natomiast $\boldsymbol{n}$ jest indeksem elementu wewnątrz niego. Nie jest to jednak jedyna możliwa baza. Możemy na przykład zaproponować taką, która składa się z ciągów odpowiadających kolejnym (zespolonym) sygnałom sinusoidalnym:

$$v'^k_n = e^{-2\pi k \frac{n}{N}} = \cos\left(-2\pi k \frac{n}{N}\right) + j \sin\left(-2\pi k \frac{n}{N}\right) \qquad (2)$$

Kolejne wektory bazy pokazuje **rysunek 3**. Na wszystkich wykresach kolorem niebieskim oznaczono część rzeczywistą, a zielonym – urojoną.

Jeżeli więc zapiszemy nasz wektor w nowej bazie, kolejne współczynniki (teraz już zespolone) będą oznaczały amplitudę i fazę kolejnych składowych, występujących w sygnale. Zwracam uwagę, że częstotliwość $\boldsymbol{k}$ jest przy próbkowaniu równoważna częstotliwości $\boldsymbol{k–N}$:

$$e^{-2\pi(k-N)\frac{n}{N}} = e^{-2\pi k \frac{n}{N} + 2\pi N \frac{n}{N}} = e^{-2\pi k \frac{n}{N} + 2\pi n} = e^{-2\pi k \frac{n}{N}} \qquad (3)$$

Ostatnia równość jest prawdziwa, ponieważ $\boldsymbol{n}$ jest zawsze liczbą całkowitą, a dodanie $\boldsymbol{2\pi}$ do argumentu funkcji trygonometrycznej, nie powoduje zmiany wyniku. Dlatego częstotliwości 5, 6 i 7 możemy interpretować także jako –3, –2 i –1 – takie podejście pokazuje **rysunek 4**. Warto zwrócić uwagę, że częstotliwości ujemne różnią się od dodatnich jedynie znakiem części urojonej. Jest to możliwe, ponieważ tak naprawdę interesują nas jedynie wartości w punktach, a nie całe krzywe. Zostały one narysowane na wykresie, ponieważ bez oznaczeń ciężko dojść, skąd się wzięły oraz co reprezentują poszczególne punkty – o czym można przekonać się, spoglądając na **rysunek 5**.

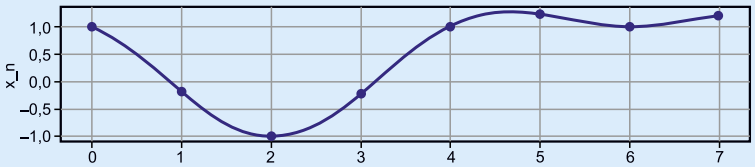
Aby przejść z jednej bazy do drugiej, potrzebujemy jeszcze macierzy przejścia. Składa się ona z kolejnych wektorów nowej bazy, wyrażonych we współczynnikach starej. W naszym przypadku jest ona dana wzorem:

$$s = \left[v'^0, v'^1, \ldots v'^{N-1}\right] \qquad (4)$$

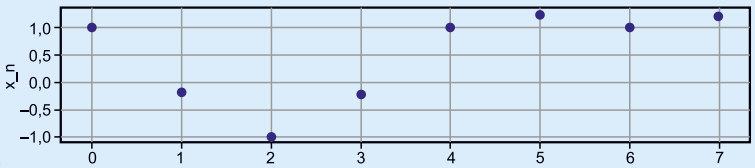
Oznacza to, że jej kolejne elementy to:

$$s_{n,k} = e^{-j2\pi \frac{kn}{N}} \qquad (5)$$

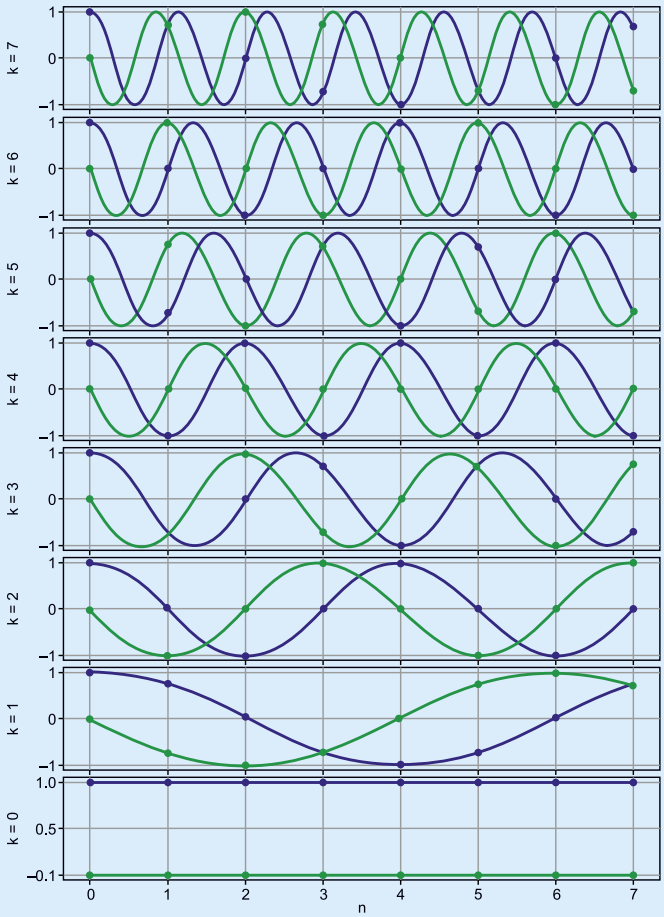
Aby uzyskać wartości współczynników naszego wektora $\boldsymbol{x}$, w nowej bazie musimy pomnożyć go przez macierz:



Rysunek 1. Ciągły sygnał wejściowy z zaznaczonymi miejscami próbkowania



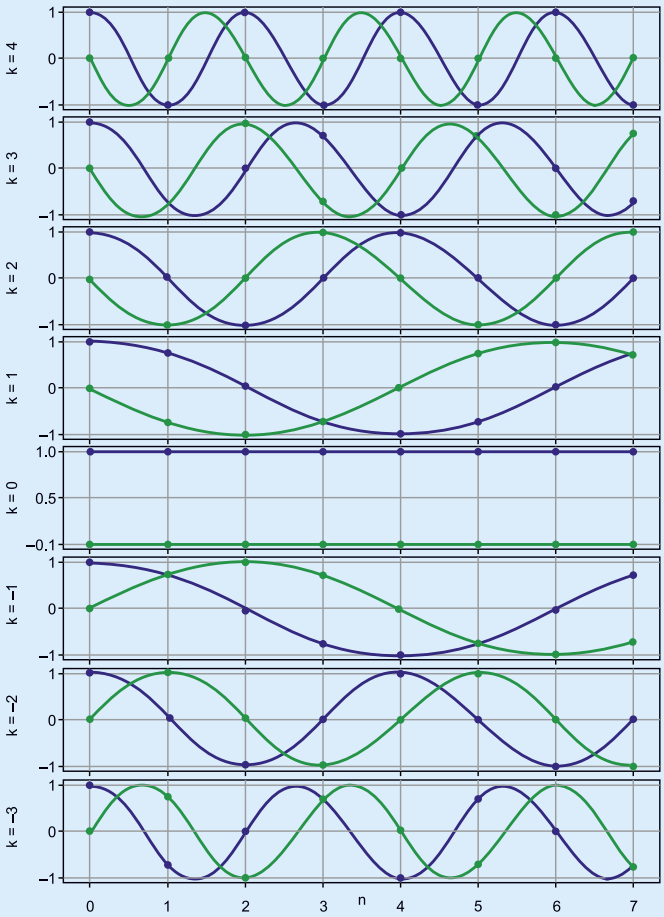
Rysunek 2. Spróbkowany sygnał z rysunku 1



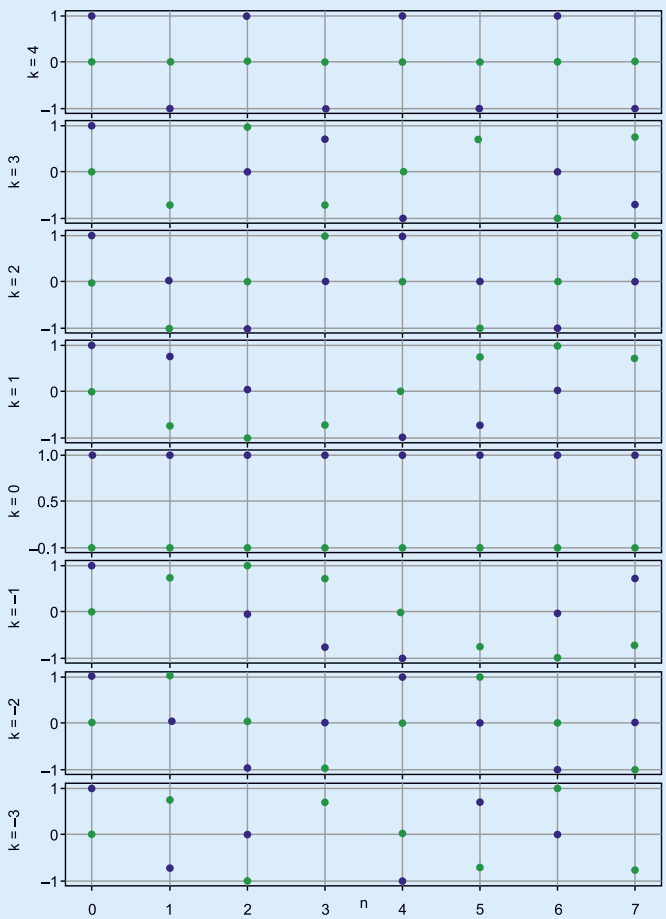
Rysunek 3. Baza złożona z zespolonych funkcji sinusoidalnych

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na na stronie www.media.avt.pl

eprasa.pl 85168ce91e



Rysunek 4. Baza z rysunku 3, ale przy interpretacji części częstotliwości jako ujemnych



Rysunek 5. Wektory bazy bez zaznaczonych pomocniczych przebiegów

$$X = sx \qquad (6)$$

Rozpisując, otrzymujemy:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} s_{n,k} x_n \qquad (7)$$

Po podstawieniu elementów macierzy z (5) otrzymujemy dobrze znany wzór na dyskretną transformatę Fouriera:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi\frac{kn}{N}} \qquad (8)$$

Gdzie zarówno ***n***, jak i ***k***, zmieniają się od ***0*** do ***N–1***. Dla uproszczenia zapisów czasami stosuje się też oznaczenie:

$$W_N^n = e^{-j2\pi\frac{n}{N}} \qquad (9)$$

Prowadzi to do krótszego zapisu:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n W_N^{kn} \qquad (10)$$

Warto zauważyć, że dla sygnału rzeczywistego części urojone muszą się zredukować. Oznacza to, że współczynniki przy częstotliwościach dodatnich będą sprzężeniem odpowiadających im współczynników przy częstotliwościach ujemnych. Nie dotyczy to częstotliwości ***0*** oraz $\frac{N}{2}$, które nie mają odpowiadających im składowych ujemnych. Nie jest to jednak problemem, ponieważ oba przebiegi są rzeczywiste.

Pozostaje jeszcze wykonanie obliczeń dla danych z rysunku 1. Otrzymana transformata to:

$$X = \left[0.5, -0.5j, 0.25, 0, 0, 0, 0.25, 0.5j\right]^T$$

Kształt poszczególnych składowych pokazuje **rysunek 6**.

FFT, czyli sprytne obliczenia

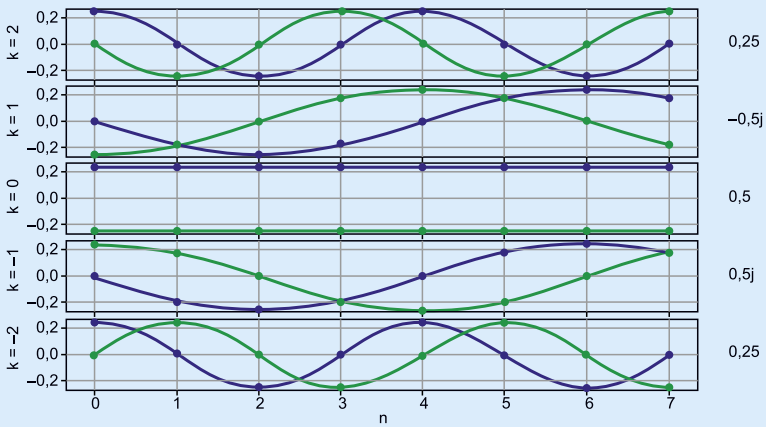
Korzystając bezpośrednio z definicji, dojdziemy do tego, że aby obliczyć pojedynczy współczynnik, musimy wykonać ***N*** mnożeń zespolonych. Ponieważ samych współczynników też jest ***N***, łatwo obliczyć, że przy naiwnym podejściu niezbędnych jest N^2 mnożeń zespolonych. Proponuję zamiast tego prosty trik, który przyspieszy obliczenia:

$$n = \frac{N}{2} n_1 + n_2 \quad n_1 = 0,1 \quad n_2 = 0,1\ldots,\frac{N}{2}-1$$

$$k = k_1 + 2k_2 \quad k_1 = 0,1 \quad k_2 = 0,1\ldots,\frac{N}{2}-1 \qquad (11)$$

Stosując inne podstawienie, można uzyskać inne wersje szybkiej transformaty Fouriera [2]. My jednak prześledzimy tylko podstawowy przypadek, w którym uzyskamy obliczenie transformaty o rozmiarze ***N*** za pomocą dwóch transformat o połowę krótszych. Podstawiając do (10), otrzymamy:

$$X_k = \sum_{n_2=0}^{\frac{N}{2}-1} \sum_{n_1=0}^{1} x_{\frac{N}{2}n_1+n_2} e^{-j2\pi\frac{(k_1+2k_2)\left(\frac{N}{2}n_1+n_2\right)}{N}} \qquad (12)$$



Rysunek 6. Składowe sygnału z rysunku 1

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na na stronie
www.media.avt.pl

eprasa.pl 85168ce91e

Na początku zajmijmy się samą potęgą. Po wymnożeniu nawiasów otrzymamy:

$$e^{-j2\pi\frac{(k_1+2k_2)\left(\frac{N}{2}n_1+n_2\right)}{N}}=e^{-j2\pi\frac{\frac{N}{2}k_1n_1+k_1n_2+2\frac{k_2N}{2}n_1+2k_2n_2}{N}} \quad (13)$$

Sumę w wykładniku możemy rozpisać jako mnożenie:

$$e^{-j2\pi\frac{\frac{N}{2}k_1n_1}{N}}\,e^{-j2\pi\frac{k_1n_2}{N}}\,e^{-j2\pi\frac{\frac{2k_2N}{2}n_1}{N}}\,e^{-j2\pi\frac{2k_2n_2}{N}} \quad (14)$$

Spróbujmy uprościć poszczególne składniki:

$$e^{-j2\pi\frac{\frac{N}{2}k_1n_1}{N}}=e^{-j\pi k_1n_1}=\cos\left(-\pi k_1n_1\right)+j\sin\left(-\pi k_1n_1\right)=$$
$$=\cos\left(-\pi k_1n_1\right)=(-1)^{k_1n_1} \quad (15)$$

Dzieje się tak, ponieważ iloczyn k_1n_1 może przyjąć jedynie wartość **0** albo **1**. Jeszcze bardziej możemy uprościć trzeci iloczyn:

$$e^{-j2\pi\frac{2\frac{k_2N}{2}n_1}{N}}=e^{-j2\pi k_2n_1}=e^{-j2\pi}=1 \quad (16)$$

Ponieważ zarówno k_2, jak i n_1 są liczbami całkowitymi, mamy zawsze do czynienia z obrotem o pełny kąt 2π. Dlatego cały czynnik upraszcza się i jest zawsze równy **1**. Korzystając z tych zależności, możemy teraz rozpisać (4) jako:

$$X_k=\sum_{n_2=0}^{\frac{N}{2}-1}\left[\left(\sum_{n_1=0}^{1}(-1)^{k_1n_1}x_{\frac{N}{2}n_1+n_2}\right)e^{-j2\pi\frac{k_1n_2}{N}}\right]e^{-j2\pi\frac{k_2n_2}{\frac{N}{2}}} \quad (17)$$

Rozpiszmy jeszcze wewnętrzną sumę. Ma ona w końcu jedynie dwa składniki:

$$X_k=\sum_{n_2=0}^{\frac{N}{2}-1}\left[\left((-1)^{k_1 0}x_{\frac{N}{2}0+n_2}+(-1)^{k_1 1}x_{\frac{N}{2}1+n_2}\right)e^{-j2\pi\frac{k_1n_2}{N}}\right]e^{-j2\pi\frac{k_2n_2}{\frac{N}{2}}} \quad (18)$$

Po usunięciu mnożeń razy **1** otrzymamy:

$$X_k=\sum_{n_2=0}^{\frac{N}{2}-1}\left[\left(x_{n_2}+(-1)^{k_1}x_{\frac{N}{2}+n_2}\right)e^{-j2\pi\frac{k_1n_2}{N}}\right]e^{-j2\pi\frac{k_2n_2}{\frac{N}{2}}} \quad (19)$$

Gdy zasłonimy sobie nawias kwadratowy i przyjrzymy się pozostałej części wzoru, zauważymy coś ciekawego. Otóż cała reszta przypomina także transformatę Fouriera, ale tym razem o długości o połowę mniejszej. Rozpiszmy teraz jeszcze indeks k, osobno dla parzystych i nieparzystych współczynników, a otrzymamy:

$$X_{2k_2}=\sum_{n_2=0}^{\frac{N}{2}-1}\left[x_{n_2}+x_{\frac{N}{2}+n_2}\right]e^{-j2\pi\frac{k_2n_2}{\frac{N}{2}}}\quad \text{dla } k_1=0$$

$$X_{2k_2+1}=\sum_{n_2=0}^{\frac{N}{2}}\left[\left(x_{n_2}-x_{\frac{N}{2}+n_2}\right)e^{-j2\pi\frac{n_2}{N}}\right]e^{-j2\pi\frac{k_2n_2}{\frac{N}{2}}}\quad \text{dla } k_1=1 \quad (20)$$

Rozpisaliśmy transformatę Fouriera o długości N na dwie transformaty o mniejszej długości. Teraz musimy wykonać pewne działania na współczynnikach, a następnie policzyć jedną transformatę dla współczynników parzystych, a drugą dla nieparzystych. Jednak sądzę, że to dobry moment, aby zakończyć ten odcinek i dać czytelnikom czas na spokojne przeanalizowanie opisanych obliczeń.

Rafał Kozik
rafkozik@gmail.com

Przypisy:

[1] Repozytorium z przykładami: http://bit.ly/33uYPxs
[2] Lyons r.G., *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010
[3] Film prezentujący działanie FFT: https://bit.ly/35H0yTp

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, faks 22 257 84 00

Wydawca:
Wiesław Marciniak

Adres redakcji:
03-197 Warszawa, ul. Leszczynowa 11
tel. 22 257 84 60
faks 22 257 84 00
e-mail: redakcja@ep.com.pl
www.ep.com.pl

Redaktor Naczelny:
Damian Sosnowski

Redaktor Programowy, Przewodniczący Rady Programowej:
Piotr Zbysiński

Menedżer Magazynu:
Katarzyna Gugała

Szef Pracowni Konstrukcyjnej:
Grzegorz Becker

Redakcja strony internetowej *www.ep.com.pl*
MAD Sp. z o.o.

Zespół marketingu i reklamy:
Katarzyna Gugała, tel. 22 257 84 64
Bożena Krzykawska, tel. 22 257 84 42
Grzegorz Krzykawski, tel. 22 257 84 60

Sekretarz Redakcji:
Grzegorz Krzykawski, tel. 22 257 84 60

DTP i okładka:
MAD Sp. z o.o.

Stali Współpracownicy:
Nikodem Czechowski, Jakub Tyburski, Lucjan Bryndza, Jarosław Doliński, Andrzej Gawryluk, Krzysztof Górski, Tomasz Jabłoński, Michał Kurzela, Szymon Panecki, Sławomir Skrzyński, Ryszard Szymaniak, Adam Tatuś, Robert Wołgajew

Uwaga!
Kontakt z wymienionymi osobami jest możliwy via e-mail, według schematu: imię.nazwisko@ep.com.pl

Prenumerata w Wydawnictwie AVT
www.avt.pl/prenumerata
lub tel. 22 257 84 22
e-mail: prenumerata@avt.pl
www.sklep.avt.pl, tel. 22 257 84 66

Prenumerata w RUCH S.A.
www.prenumerata.ruch.com.pl
lub tel. 801 800 803, 22 717 59 59
e-mail: prenumerata@ruch.com.pl

Wydawnictwo AVT-Korporacja Sp. z o.o. należy do **Izby Wydawców Prasy**

Copyright AVT-Korporacja 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 85168ce91e

Hity następnego numeru • „Elektronika Praktyczna” 12/2020

Lampowy preamp

Prezentowany przedwzmacniacz przeznaczony będzie do używania z wkładką typu MM, której sygnał wyjściowy ma napięcie ok. 4...5 mV. Przez dziesięciolecia opracowano masę układów elektronicznych wzmacniających sygnał z wkładki gramofonowej. Początkowo były to układy wykorzystujące lampy elektronowe, później tranzystory, a obecnie stosowane są wzmacniacze operacyjne o doskonałych parametrach. Jednak eidok gramofonu z obecnym obok przedwzmacniaczem lampowym jest niepowtarzalny, dlatego też autor zdecydował się na użycie lamp.

Kolorofon cyfrowy

Kolorofon był 3 kanałowym sterownikiem oświetlenia, którego każdy z kanałów sterowany był sygnałem audio z innego zakresu częstotliwości dając ciekawy efekt wizualny pogłębiający doznania dźwiękowe. Było to urządzenie w pełni analogowe, w którym stosowano proste filtry pasmowo-przepustowe i nie mniej proste obwody wyjściowe sterujące żarówkami małej mocy. Autor postanowił skonstruować podobne urządzenie, lecz wykonane w technice mikroprocesorowej, której zadaniem byłaby kompletna obsługa sygnałów audio bez potrzeby stosowania analogowych filtrów wejściowych. Docelowa implementacja korzystała z bardzo prostego mikrokontrolera o ograniczonych zasobach sprzętowych udowadniając w ten sposób, że nawet skomplikowane, zadania programowe można zrealizować przy użyciu minimalnych zasobów sprzętowych.

Analogowa klawiatura dotykowa

Klawiatura dotykowa ma wiele zalet w stosunku do klawiatury z przełącznikami mechanicznymi. Dodatkowo, dzięki analogowemu interfejsowi wykorzystuje tylko jeden pin procesora do komunikacji. Do obsługi klawiatury użyto kontrolera typu AT42QT1040, który obsługuje cztery pola dotykowe z funkcją przycisku chwilowego. Jako sensory służą pola miedziane o średnicy 10 mm, wykonane bezpośrednio na płytce drukowanej. Sygnalizacja stanu klawiszy na inteligentnych diodach RGB jeszcze poszerza możliwości klawiatury.

Minimoduł z mikroprocesorem LPC802

Moduł z procesorem NXP typu LPC802 może być ciekawą alternatywą dla popularnych płytek z procesorami AVR (ArduinoEvery), STM (Nucleo) szczególnie, gdy nie mamy zbyt wiele miejsca, a nie chcemy rezygnować z wydajności. Najmniejszy przedstawiciel rodziny LPC80x, ma rdzeń Cortex-M0+, 16 kB Flash, 2 kB RAM, elastycznie konfigurowane wyprowadzenia GPIO oraz wiele peryferiów. Dzięki wbudowanemu bootloaderowi procesor można programować w systemie poprzez port szeregowy UART.

a ponadto tematy wiodące EP 12/2020:

ELEKTRONIKA W MEDYCYNIE

SPRZĘT WARSZTATOWY. NARZĘDZIA DLA PRACOWNI I SERWISU

CZUJNIKI CZYNNIKÓW ŚRODOWISKOWYCH

Wykaz firm ogłaszających się w tym numerze „Elektroniki Praktycznej”

AKSOTRONIK 115
ARMEL 115
BORNICO 6
COMPUTER CONTROLS 9, 75
DELTA-OPTI 115
EGMONT 43, 45
ELHURT 85, 87
ELMAX 115
FERYSTER 8
GAMMA 8
KRADEX 65, 66
MICROCHIP 7
MICROS 67, 69
PIEKARZ 8
RELPOL 19
RENEX 8
RUTRONIK 27
ST MICROELECTRONICS 5, 21, 25, 35, 39, 70

eprasa.pl 85168ce91e

INTERESUJESZ SIĘ **ELEKTRONIKĄ** LUB **TECHNIKĄ?**

SIĘGNIJ PO DUŻĄ DAWKĘ SPECJALISTYCZNEJ WIEDZY

NA **WWW.ULUBIONYKIOSK.PL** - PRZESYŁKA GRATIS

eprasa.pl 85168ce91e