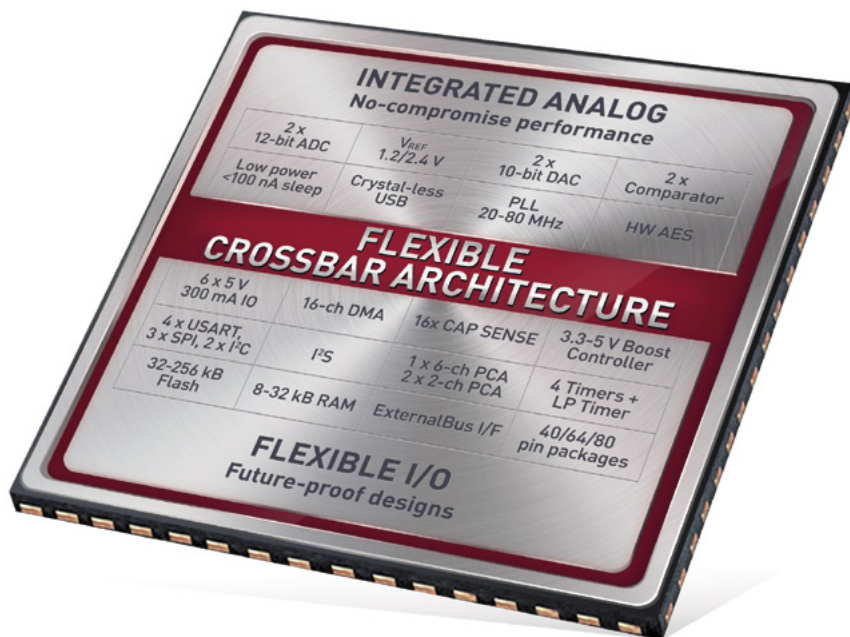


# Mikrokontrolery Precision32 – budowa wewnętrzna

W poprzednim miesiącu na łamach *Elektroniki Praktycznej* prezentowaliśmy cechy wyróżniające rodzinę układów Precision32 na tle innych mikrokontrolerów z rdzeniem ARM Cortex-M3. W tym artykule zaprezentujemy bardziej szczegółowo mikrokontrolery Precision32, pokazując ich budowę wewnętrzną oraz opisując krótko każdy blok funkcjonalny.



Precision32 to pierwsza w ofercie firmy Silicon Labs rodzina mikrokontrolerów z rdzeniem ARM Cortex-M3. Składa się z 32 układów i podzielona została na dwie podgrupy: SiM3C1xx (nazwane *Analog-Intensive MCUs*, 16 układów) oraz SiM3U1xx (o nazwie *USB MCUs*, 16 układów). Różnica między obiema grupami jest jedna – w układach SiM3U1xx jest interfejs USB, natomiast w SiM3C1xx go nie ma.

Podstawowe cechy mikrokontrolerów Precision32:

- Sercem każdego mikrokontrolera jest rdzeń ARM Cortex-M3, który może być taktowany z maksymalną częstotliwością 80 MHz.
- Układy oferowane są w obudowach o różnej ilości wyprowadzeń: od 40 do 92 (40, 64, 80, 92), oraz różnych kształtach: QFN, TQFP, LGA.
- Mikrokontrolery mogą pracować w zakresie temperatury od -40 do +85°C.

- Wszystkie układy spełniają wymagania RoHs.
- W zależności od modelu, mikrokontroler może być wyposażony w pamięć Flash od 32 do 256 kB (32 kB, 64 kB, 128 kB lub 256 kB) oraz pamięć RAM od 8 do 32 kB (8 kB, 16 kB lub 32 kB).
- Układy mogą być zasilane napięciem z przedziału 1,8...5,5 V.

Pełne zestawienie wszystkich układów Precision32 przedstawiono na **rysunku 1**.

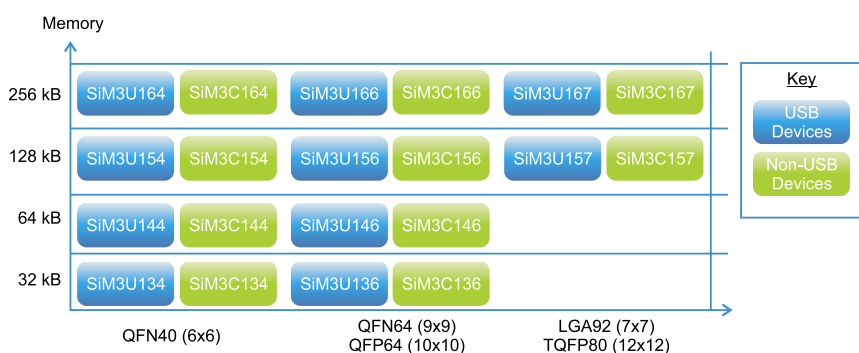
## Budowa wewnętrzna mikrokontrolerów Precision32

Schemat wewnętrzny mikrokontrolera Precision32 z interfejsem USB, a więc z rodziny SiM3U1xx pokazano na **rysunku 2**. Zintegrowane w układzie zasoby można pogrupować w sześć bloków (każdy zostanie oddzielnie omówiony w dalszej części artykułu):

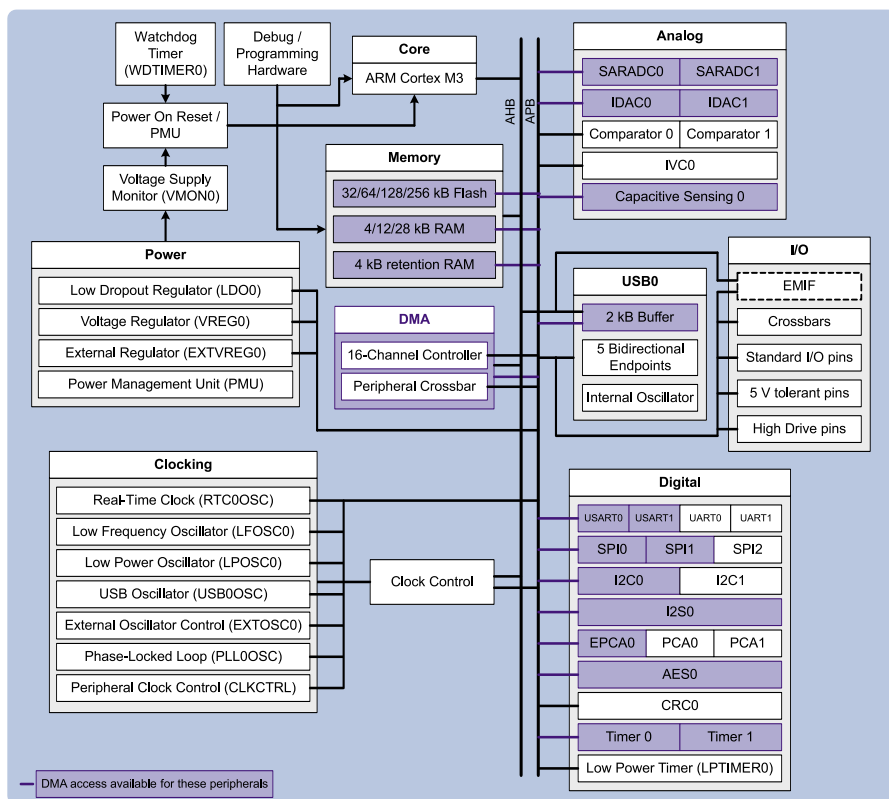
- Rdzeń i peryferia.
- Blok pamięci.
- Blok zasilania.
- Blok generatorów sygnałów zegarowych.
- Blok peryferiów analogowych.
- Blok peryferiów cyfrowych.

Zasoby połączone są ze sobą za pomocą dwóch magistral. Pierwsza magistrala o nazwie AHB (*Advanced High-performance Bus*) łączy rdzeń z zasobami pamięci, blokiem zegarów oraz modułem DMA. Druga magistrala, nazwana APB (*Advanced Peripheral Bus*), odpowiada za sterowanie i komunikację między peryferiami.

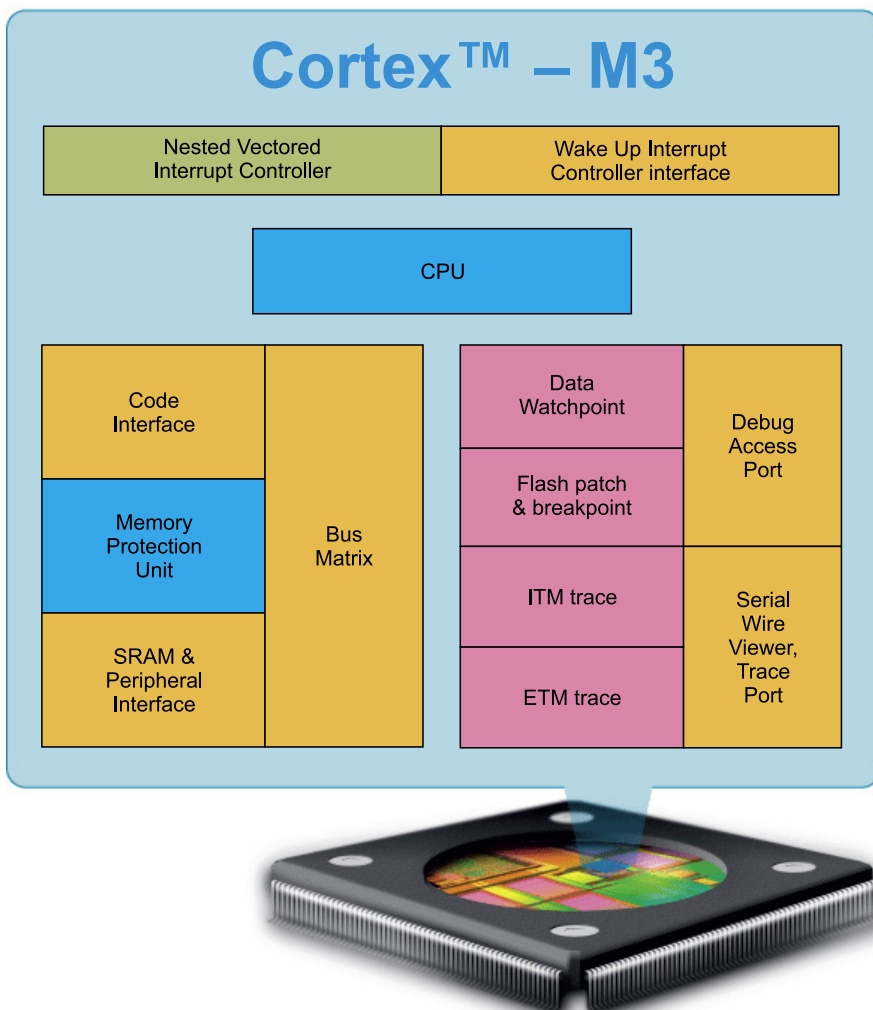
## SiM3U1xx/SiM3C1xx Device Matrix



Rysunek 1. Oferta mikrokontrolerów z rodziny Precision32



Rysunek 2. Budowa wewnętrzna mikrokontrolerów Precision32 SiM3U1xx



Rysunek 3. Rdzeń Cortex-M3

### Rdzeń ARM Cortex-M3

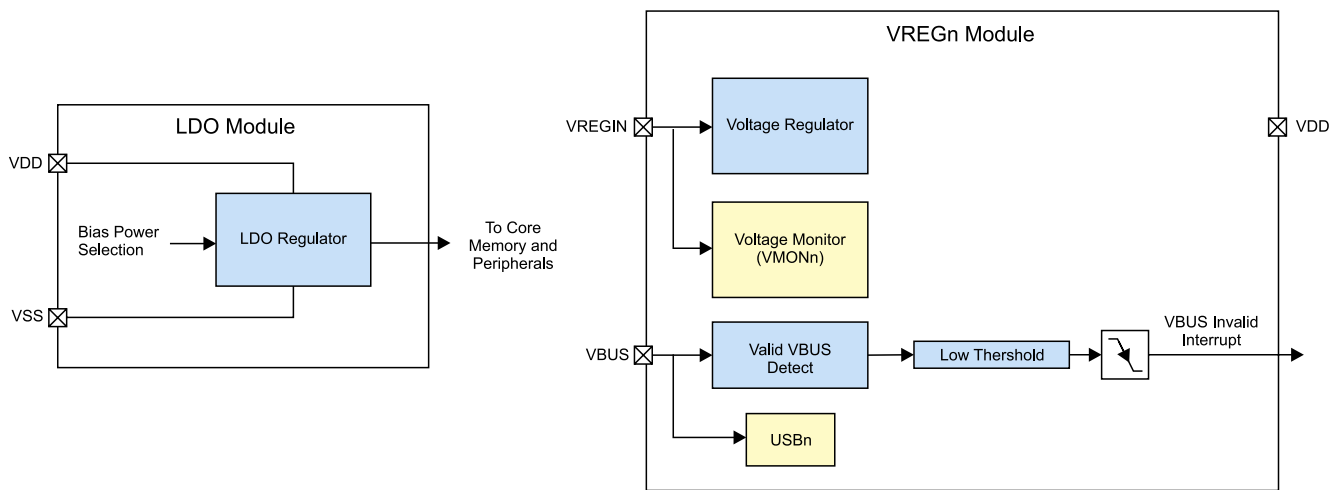
Sercem każdego mikrokontrolera z rodziny Precision32 jest 32-bitowy rdzeń ARM Cortex-M3, który może pracować taktowany sygnałem o częstotliwości maksymalnej 80 MHz. Jego budowę przedstawiono na **rysunku 3**. Poniżej wymieniono jego najważniejsze cechy.

- Cortex-M3 wykorzystuje architekturę ARMv7M. Jest ona zgodna z architekturą harwardzką, co oznacza, że pamięć programu jest oddzielona od pamięci danych.
- Jest to rdzeń typu RISC (*Reduced Instruction Set Computer*).
- Rdzeń Cortex-M3 cechuje się 3-stopniowym przetwarzaniem potokowym instrukcji. Oznacza to, że proces przetwarzania każdej instrukcji składa się z trzech etapów (pobrania, zdekodowania i wykonania) i są one wykonywane jednocześnie (podczas gdy jedna instrukcja jest pobierana, inna może być zdekodowana, a jeszcze inna wykonywana).
- Cortex-M3 obsługuje listę instrukcji Thumb-2. Zawiera ona polecenia umożliwiające wykonywanie operacji zarówno na danych 16-, jak i 32-bitowych.
- W rdzeniu zaimplementowano sprzętowy moduł wykonujący operacje dzielenia liczb.
- Rdzeń wyposażony jest w 16 32-bitowych rejestrów podstawowych (R0...R15) oraz rejestry specjalne.
- Wydajność rdzenia wynosi 1.25 DMIPS/MHz (2.17 CoreMark/MHz).
- Elementami rdzenia są kontroler przerw NVIC (*Nested Vectored interrupt Controller*), interfejsy debugowania, śledzenia i programowania (JTAG, ETM, SWD).

### Blok pamięci

Zasoby pamięci mikrokontrolerów Precision32 obejmują pamięć Flash oraz pamięć RAM. W zależności od modelu, układ może być wyposażony w pamięć Flash od 32 do 256 kB (32 kB, 64 kB, 128 kB, 256 kB) oraz pamięć RAM od 8 do 32 kB (8 kB, 16 kB, 32 kB). W pamięci RAM wydzielony został odrębny obszar o pojemności 4 kB, o nazwie *retention RAM*. Pamięć ta, w przeciwieństwie do pozostałej części pamięci RAM, jest w stanie przechowywać dane w każdym stanie uśpienia mikrokontrolera, nawet w najgłębszym PM9 (*Power Mode 9*, opisany w dalszej części artykułu), gdy zawartość wspomnianej standardowej pamięci RAM nie jest podtrzymywana.

Rozszerzenie zasobów pamięci jest możliwe za pomocą interfejsu EMIF (*External Memory Interface*), przy użyciu którego można do mikrokontrolera dołączyć pamięć zewnętrzną.



Rysunek 4. Regulatory napięcia mikrokontrolera Precision32: z lewej strony regulator LDO0, z prawej strony regulator VREG0

**Blok zasilania**

Firma Silicon Labs zintegrowała w mikrokontrolerach Precision32 rozbudowany blok zasilania. Omawianie go zaczniemy od opisanie dwóch regulatorów napięcia, z których każdy może być zasilany z wyprowadzeń zasilających (VDD, VSS) i może służyć do zasilania mikrokontrolera gwarantując jego w pełni funkcjonalną pracę. Pierwszy z nich to regulator typu LDO (*Low Drop Out*), o nazwie LDO0. Dopuszczalne napięcie wejściowe tego regulatora wynosi 1,8...3,6 V. Napięcie wyjściowe zasilające rdzeń, pamięć i peryferia to 1,8 V. Drugi regulator napięcia oznaczono jako VREG0. Akceptuje on napięcie wejściowe z zakresu 2,7...5,5 V. Może on służyć jako źródło zasilania opisanego wyżej regulatora LDO0. Dzięki szerokiemu przedziałowi napięcia zasilania regulatora VREG0, istnieje możliwość zasilania mikrokontrolera bezpośrednio z gniazda USB (występuje w nim napięcie o wartości 5 V). Budowę obu regulatorów przedstawiono na rysunku 4.

Na rysunku 5 zilustrowano dwa sposoby zasilania mikrokontrolera Precision32 – z aktywnym oraz wyłączonym regulatorem VREG0.

Oprócz wymienionych już regulatorów napięcia służących do zasilania mikrokontrolera, w każdym układzie Precision32 występuje regulator o nazwie EXTVREG0, który przeznaczony jest do dostarczania napięcia zasilania układom peryferyjnym, a więc na zewnątrz mikrokontrolera. Może być również użyty do sterowania tranzystorami. Jego napięcie wyjściowe jest konfigurowalne – możliwe jest ustawienie wartości z przedziału 1,8...3,6 V z krokiem 100 mV. Wydajność prądu regulatora wynosi 1 A.

Kolejnym komponentem składowym bloku zasilania jest moduł VMON0 odpowiedzialny za monitorowanie napięcia zasilania. Do jego funkcji należy między innymi:

- Informowanie o przekroczeniu dolnej wartości napięcia zasilania.

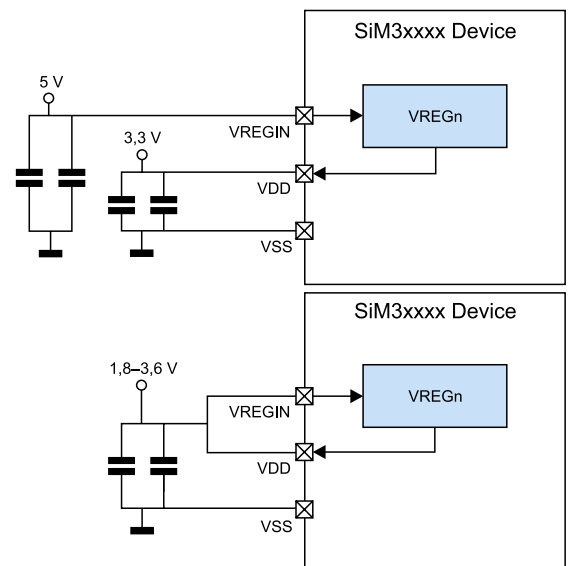
- Utrzymywanie mikrokontrolera w stanie resetu po przekroczeniu ustalonego progu napięcia zasilania.

Ostatnim istotnym elementem bloku zasilania jest jednostka zarządzająca zasilaniem (PMU – *Power Management Unit*). Wśród wielu jej funkcji, najważniejszą jest udostępnianie różnych trybów pracy, których umiejętnie wykorzystanie pozwala na znaczne ograniczenie poboru prądu mikrokontrolera. Jednostka PMU oferuje łącznie 6 trybów pracy, w tym pięć o niskim poborze mocy (tak zwane tryby uśpienia):

- *Normal* – rdzeń i peryferia są aktywne, jest wykonywany program z pamięci Flash.
- *PM1 (Power Mode 1)* – rdzeń i peryferia są aktywne, jest wykonywany program z pamięci RAM.
- *PM2 (Power Mode 2)* – rdzeń jest zatrzymany, peryferia są aktywne,
- *PM3FW (Power Mode 3 Fast Wake)* – rdzeń i peryferia są zatrzymane, część sygnałów zegarowych jest wyłączona.
- *PM3 (Power Mode 3)* - rdzeń i peryferia są zatrzymane, wszystkie sygnały zegarowe są wyłączone.
- *PM9 (Power Mode 9)* - rdzeń i peryferia są zatrzymane, wszystkie sygnały zegarowe są wyłączone, zawartość pamięci RAM nie jest podtrzymywana (oprócz wspomnianego obszaru 4 kB *retention RAM*).

**Blok generatorów sygnałów zegarowych**

Mikrokontroler Precision32 jest wyposażony w sześć źródeł sygnałów zegarowych. Są to: LPOSC0 (*Low Power Oscillator*), LFOSC0 (*Low Frequency Oscillator*), RTC0OSC (*RTC Oscillator*), EXTOSC0 (*External Oscillator*), USB0OSC (*USB Oscillator*), PLL0OSC (*PLL*

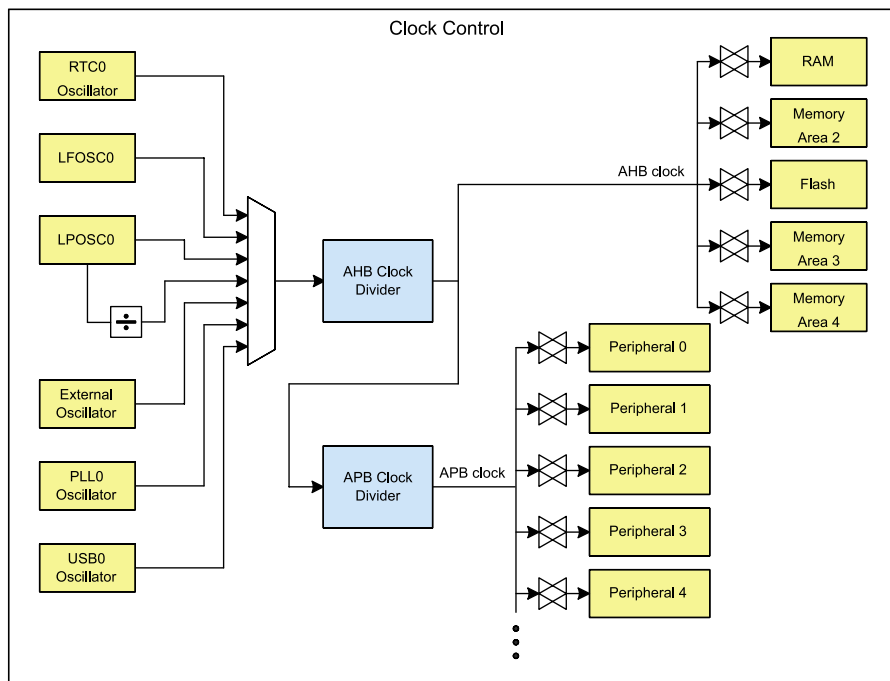


Rysunek 5. Zasilanie mikrokontrolera Precision32 z regulatora VREG0 (górny obrazek) lub z regulatora LDO0 (dolny obrazek)

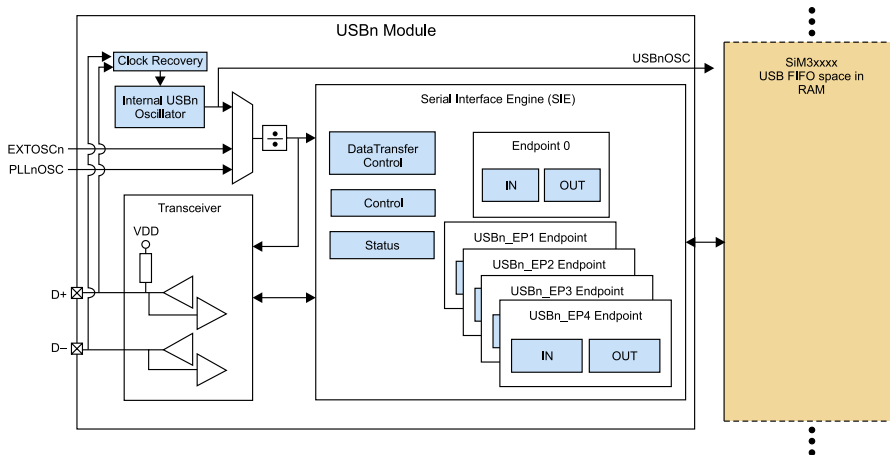
*Oscillator*). Każde z nich może generować sygnał taktujący zegar rdzenia, magistralę AHB i APB oraz peryferiów (rysunek 6).

Domyślnie aktywnym po uruchomieniu mikrokontrolera źródłem sygnału zegarowego jest LPOSC0. Może ono generować sygnał zegarowy o częstotliwości 20 MHz, lub ośmiokrotnie niższy – 2.5 MHz. Jak sama nazwa wskazuje, jest to źródło sygnału zegarowego o niskim poborze prądu, jednak oszczędność energii odbywa się kosztem dokładności sygnału, która jest gorsza niż w przypadku innych źródeł zegarowych. Negatywny wpływ na dokładność sygnału zegarowego ma dodatkowo zmiana temperatury oraz napięcia zasilania.

Drugie źródło sygnału zegarowego to LFOSC0. Może ono być wykorzystane zarówno do taktowania mikrokontrolera, jak również tylko jako zegar czasu rzeczywistego. Użycie LFOSC0 gwarantuje niskie zużycie energii, jednakże wadą tego rozwiązania jest niska częstotliwość (16,4 kHz) oraz niezbyt wysoka dokładność generowanego sygnału.



Rysunek 6. Blok zegarowy mikrokontrolera Precision32



Rysunek 7. Moduł USB mikrokontrolera Precision32

Trzecim źródłem sygnału zegarowego jest RTC0OSC. Generowany przez nie sygnał zegarowy ma częstotliwość równą 32,768 kHz i podobnie jak w poprzednim przypadku, może być użyty zarówno do taktowania mikrokontrolera, jak również może być wykorzystany tylko jako zegar czasu rzeczywistego. Korzystanie z tego źródła sygnału zegarowego wymaga podłączenia do mikrokontrolera zewnętrznego rezonatora kwarcowego 32,768 kHz. RTC0OSC charakteryzuje się wysoką dokładnością generowanego sygnału zegarowego.

Kolejne źródło sygnału zegarowego to EXTOSC0. Zgodnie z nazwą, do jego działania konieczne jest podłączenie do mikrokontrolera rezonatora kwarcowego. Jego maksymalna dopuszczalna częstotliwość to 50 MHz. Dzięki zewnętrznemu rezonatorowi kwarcowemu sygnał zegarowy będzie się charakteryzował wysoką dokładnością.

Następnym źródłem sygnału zegarowego jest USBOSC. Generuje ono sygnał zegarowy o częstotliwości 48 MHz, który może służyć

do taktowania mikrokontrolera, ale przede wszystkim przewidziany jest do umożliwienia działania interfejsowi USB. Rozwiązanie to pozwala na projektowanie urządzeń USB bez konieczności integracji na płycie PCB dodatkowego rezonatora kwarcowego.

Ostatnie ze źródeł sygnału zegarowego - PLL0OSC - jest mechanizmem, który bazując na sygnale referencyjnym jest w stanie modyfikować jego częstotliwość (poprzez mnożenie i dzielenie wartości początkowej). Sygnał referencyjny dla PLL0OSC może pochodzić ze źródeł sygnału zegarowego RTC0OSC, LPOSC0, EXTOSC0 i USBOSC. PLL0OSC może przy ich pomocy wygenerować sygnał o częstotliwości od 23 MHz do wartości maksymalnej, z jaką pracować może mikrokontroler, a więc 80 MHz. Źródło sygnału zegarowego PLL0OSC może pracować w jednym z trzech trybów: *free-running DCO*, *frequency-locked*, *phase-locked*.

W kontekście sygnałów zegarowych mikrokontrolera Precision32 warto nadmienić

jeszcze, że każde peryferium ma swój indywidualny zegar. Wszystkie zegary peryferijne są domyślnie wyłączone. Użytkownik może je włączać tylko w czasie, gdy korzysta z danego zasobu, co pozwala na ograniczenie zużycia energii przez mikrokontroler.

### Blok peryferiów analogowych

Omawianie peryferiów analogowych rozpoczniemy od opisanego przetworników A/C i C/A. Mikrokontrolery Precision32 wyposażone zostały w dwa przetworniki A/C typu SAR (*Successive Approximation Register*), nazwane SARADC0 i SARADC1. Konwertują one napięcie do postaci 12- lub 10-bitowego słowa. W zależności od ustawionej rozdzielczości, prędkość próbkowania wynosić może odpowiednio do 250 KS/s i 1 MS/s. W zależności od modelu mikrokontrolera, przetwornik SARADC0 może dysponować od 7 do 16, a przetwornik SARADC1 od 11 do 16 kanałami pomiarowymi.

W mikrokontrolerach Precision32 zintegrowano dwa przetworniki C/A, o nazwie IDAC0 i IDAC1. Nie są to konwencjonalne przetworniki, gdyż nie zamieniają wartości cyfrowej na napięcie, ale na prąd. Górny próg zakresu prądu może być ustawiony na jedną z trzech wartości: 0.5 mA, 1.0 mA i 2.0 mA. Dla rozdzielczości przetworników, która wynosi 10 bitów, wartość prądu może być ustawiona odpowiednio dla wymienionych zakresów z krokiem 2  $\mu$ A, 1  $\mu$ A i 500 nA.

Kolejnym peryferium analogowym mikrokontrolerów Precision32 jest przetwornik pojemnościowo-cyfrowy. Może on służyć do obsługi klawiatur pojemnościowych (obsługiwane są przez niego nie tylko przyciski, ale również suwaki pojemnościowe typu *slider* i *wheel*). Zależnie od modelu układu, przetwornik może mieć od 12 do 16 kanałów.

Zasoby analogowe mikrokontrolerów Precision32 uzupełniają dwa komparatory analogowe CMP0 i CMP1 (od 3 do 8 kanałów na każdy komparator) o niskim poborze prądu (400 nA w energooszczędnym trybie pracy) oraz przetwornik prądowo-napięciowy IVC0 (dwa kanały, zakres prądu wejściowego od 1 do 6 mA) pozwalający mierzyć wartość prądu na wejściach przetwornika A/C.

### Blok peryferiów cyfrowych

Pierwszą grupę peryferiów cyfrowych stanowią interfejsy komunikacyjne. Należą do niej interfejsy: USART/UART (z możliwością komunikacji w standardzie IrDA i SmartCard), SPI, I<sup>2</sup>C oraz I<sup>2</sup>S. W serii układów SIM3U1xx producent zintegrował dodatkowo interfejs USB 2.0 Full Speed. Dzięki wbudowanemu w mikrokontrolerze źródłu zegara USBOSC oraz kompletnemu interfejsowi USB (PHY, obwód terminujący, rezystor dołączony do linii USB D+), do działania USB nie jest potrzebne dołączenie do mikrokontrolera żadnych dodatkowych



komponentów. Budowę modułu USB mikrokontrolera Precision32 przedstawiono na rysunku 7.

Drugą grupą peryferiów cyfrowych są układy czasowe (*timers*) i układy licznikowe (*counters*). Znajdują się w niej:

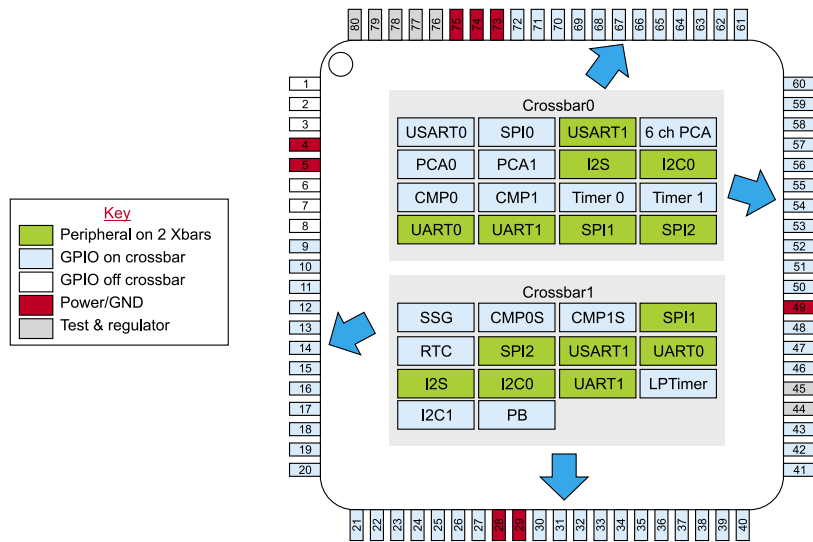
- Dwa 32-bitowe układy czasowe TIMER0 i TIMER1 (alternatywnie mogą działać jako 4 16-bitowe układy czasowe) z funkcją *capture/compare*.
- Dwa 2-kanalowe, 16-bitowe układy licznikowe PCA0 i PCA1 z funkcją *capture/compare/PWM*.
- 6-kanalowy (3 pary), 16-bitowy układ licznikowy EPCA0 z funkcją *capture/compare/PWM*.
- Energooszczędny 16-bitowy układ czasowy/licznik impulsów LPTIMER0, działający we wszystkich trybach pracy o niskim poborze prądu.
- 32-bitowy zegar RTC (RTC0).
- Licznik Watchdog (WDTIMER0).

Wśród peryferiów cyfrowych znajdują się dwa zasoby odpowiedzialne za zwiększenie niezawodności i bezpieczeństwa przesyłanych danych. Za pierwszą funkcję odpowiada moduł CRC (*Cyclic Redundancy Check*), a za drugą moduł AES (*Advanced Encryption Standard*). Moduł CRC poprzez dodawanie do przesyłanych danych (w pamięci Flash lub w protokołach komunikacyjnych) kodu nadmiarowego może wykrywać pojawiające się podczas transmisji błędy. Moduł CRC może korzystać z czterech wielomianów: jednego 32-bitowego (dla standardu IEEE 802.3) i trzech 16-bitowych (dla standardów CCIT-16, MBus, ZigBee i USB). Moduł AES odpowiedzialny jest z kolei za szyfrowanie danych. Mechanizm ten wykorzystuje klucze 128-, 192- lub 256-bitowe.

Kolejnym zasobem należącym do peryferiów cyfrowych jest moduł DMA. Umożliwia on, bez użycia rdzenia, transfer danych pomiędzy następującymi peryferiami mikrokontrolera: przetwornikami A/C, C/A i pojemnościowo-cyfrowym, interfejsami USB, I<sup>2</sup>C, I<sup>2</sup>S, SPI i USART/UART, układami czasowymi, układem licznikowym EPCA0 oraz modułem AES.

Następnym zasobem cyfrowym są linie ogólnego przeznaczenia (I/O – *Input/Output*). Jest ich, w zależności od modelu mikrokontrolera, od 28 do 65. Co ważne, 12 z nich toleruje zakres napięcia wejściowego 5 V, nie-

## Crossbar Enables Maximum Flexibility



Rysunek 8. Crossbar

zależnie od poziomu napięcia zasilania. Dodatkowo 6 linii I/O jest wysokoprądowych. Maksymalny prąd wyjściowy każdej z nich to 300 mA.

Ostatnim z peryferiów cyfrowych jest tak zwany Crossbar. Jest to autorski mechanizm firmy Silicon Labs, który umożliwia bardzo elastyczną konfigurację przyporządkowania peryferiów mikrokontrolera do jego wyprowadzeń. Funkcjonalność ta z pewnością może pomóc optymalnie zaplanować płytę PCB upraszczając układ ścieżek i zmniejszając efektywnie jej powierzchnię. W rodzinie Precision32 występują dwa niezależne moduły Crossbar. Crossbar 0 odpowiada za przyporządkowanie peryferiów do pinów z grupy PB0 i PB1, natomiast Crossbar 1 pozwala na przyporządkowanie peryferiów do pinów z grupy PB2 i PB3 (rysunek 8).

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono opis budowy wewnętrznej i peryferiów mikrokontrolerów z rodziny Precision32. Forma przekazu treści w postaci artykułu pozwala jedynie na skrótowne przedstawienie omawianych zagadnień, dlatego czytelnicy zainteresowani bardziej szczegółowymi informacjami powinni skorzystać z dokumentacji technicznej producenta: not katalogowych, przewodników użytkownika oraz dokumentów zwanych *white papers*.

Był to drugi z cyklu artykułów poświęconych mikrokontrolerom Precision32 firmy Silicon Labs. Tematyka następnych części to:

- Narzędzia projektowe (programowe oraz sprzętowe),
- Rozpoczęcie pracy z mikrokontrolerem Precision32 krok po kroku, przy wykorzystaniu zestawu ewaluacyjnego,
- Porównanie układów Precision32 z innymi rodzinami mikrokontrolerów z rdzeniem ARM Cortex-M3,
- Autorski projekt prostego zestawu startowego.

Autor składa podziękowanie Panu Tadeuszowi Górnickiemu, prezesowi firmy WG Electronics oraz Panu Sándor Csüllög, inżynierowi aplikacyjnemu z firmy Silicon Labs, za pomoc w realizacji artykułu.

**Szymon Panecki**  
Wydział Elektroniki  
Politechnika Wrocławska  
szymon.panecki@pwr.wroc.pl

### Literatura

- [1] [www.silabs.com](http://www.silabs.com) SIM3U1xx/SIM3C1xx datasheet
- [2] [www.silabs.com](http://www.silabs.com) SIM3U1xx/SIM3C1xx reference manual
- [3] [www.silabs.com](http://www.silabs.com) The Precision32 Family of Mixed-Signal MCUs By Linley Gwennap, white paper

**Minimoduł ATTiny2313  
AVT1610**

[www.sklep.avt.pl](http://www.sklep.avt.pl)

