

# μC z taaaakim przetwornikiem A/C

## Gdy ważny jest rozmiar próbki

*Przetworniki A/C są układami peryferyjnymi prawie wszystkich współczesnych mikrokontrolerów.*

*Mają zazwyczaj architekturę SAR lub sigma-delta i różnią się głównie sposobem przetwarzania próbki sygnału.*

*Odpowiedź przetwornika SAR jest cyfrową postacią chwilowej wartości sygnału, natomiast w przetworniku sigma-delta następuje uśrednianie mierzonego sygnału w krótkim odcinku czasu.*

*Dane z przetwornika SAR mogą być zafałszowane zakłóceniami szpilkowymi, natomiast dane z przetwornika sigma-delta są wskutek uśredniania poddawane filtracji. Ponieważ przetworniki sigma-delta pracują z większą częstotliwością niż SAR, to pobierają więcej prądu przy tej samej prędkości próbkowania.*

*Przetworniki SAR znajdują zastosowanie w aplikacjach, w których wymagana jest szybka odpowiedź przetwornika i małe opóźnienie w przetwarzaniu sygnałów, na przykład w aplikacjach sterowania.*

*Natomiast przetworniki sigma-delta stosowane są z reguły w urządzeniach, w których istotna jest duża rozdzielczość przetwornika, jak na przykład urządzenia audio czy urządzenia pomiarowe.*

W mikrokontrolerach ogólnego przeznaczenia dominują głównie przetworniki o rozdzielczości 8 lub 10 bitów. W artykule zostaną przedstawione mikrokontrolery, w których zastosowano przetwornik A/C o rozdzielczości 12 lub więcej bitów.



### Pomiarowa 51

Wśród mikrokontrolerów pomiarowych jednym z najpopularniejszych jest klon rdzenia 8051. Mikrokontrolery takie, z przetwornikami o dużej rozdzielczości, mają w swojej ofercie firmy: Analog Devices, Silicon Laboratories oraz Texas Instruments.

W ofercie firmy Silicon Laboratories, w grupie Precision Mixed-Signal z przetwornikami A/C o rozdzielczości 10 i więcej bitów, są układy oznaczone symbolami: C8051F0xx, C8051F01x, C8051F02x, C8051F04x, C8051F06x, C8051F12x/3x, C8051F35x i C8051F70x/71x. Są to mikrokontrolery ze zmodyfikowanym rdzeniem 8051 (architektura potokowa, ok. 70% instrukcji wykonywanych w 1 lub 2 taktach sygnału zegarowego), które mogą być taktowane sygnałem zegarowym o częstotliwości do 100 MHz. Można w nich osiągnąć szybkość wykonywania instrukcji do 100 MIPS (przy 100 MHz). Niektóre układy (np. C8051F120,1,2,3 i C8051F130,1,2,3)

mają blok MAC 16x16 bitów, w którym wykonywane są operacje mnożenia w dwóch cyklach zegarowych. Większość układów tej firmy ma przetworniki typu SAR. Układy oznaczone symbolami C8051F35x wyposażono w przetworniki A/C sigma-delta o rozdzielczości 16 lub 24 bitów.

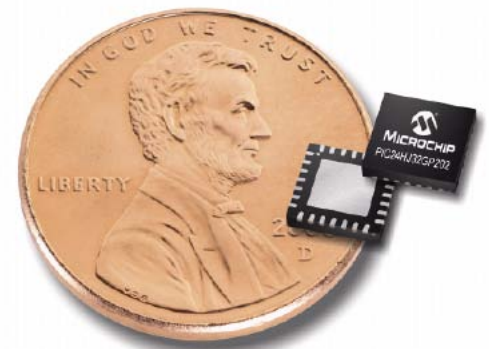
Wśród „pomiarowych” mikrokontrolerów 8051 znajdują się również produkty firmy Texas Instruments. Oznaczone symbolem MSC12xx mają 4...32 kB pamięci Flash i mogą być taktowane sygnałem zegarowym do 33 MHz lub 40 MHz (MSC121x). Zawierają zmodyfikowany rdzeń 8051, który musi być taktowany 4 sygnałami zegarowymi na jeden cykl instrukcji. Napięcie zasilania tych układów wynosi 2,7...5,25 V, a pobór mocy przy napięciu 3 V wynosi typowo mniej niż 4 mW. Wszystkie mikrokontrolery z tej rodziny (poza MSC1202) mają 24-bitowe przetworniki sigma-delta oraz obwody kalibracji, dzięki którym dryft offsetu wynosi 0,1 ppm/°C, a dryft wzmo-

Tab. 1. Zestawienie mikrokontrolerów z przetwornikami A/C

Symbol	Rdzeń	F <sub>MAX</sub> [MHz]	MIPS	Flash [kB]	RAM [B]	GPIO	Przetwornik A/C		Przetwornik C/A		
							Rozdziel- czość [b]	Prędkość [kS/s]	Liczba kanałów	Rozdziel- czość [b]	Liczba kanałów
Analog Devices											
ADUC7019	ARM7 TDMI		40	62	8192	14	12	1000	5	12	3
ADUC702x	ARM7 TDMI		40	62	8192	13/30/40	12	1000	5...16	12	0,2...4
ADUC703x	ARM7 TDMI		20,40	32/96	4096...6144	9	16	8	2	-	-
ADUC706x	ARM7 TDMI		10	32	4096	8,14	24	8	10	14	
ADUC712x	ARM7 TDMI		40	126	8192	28	12	1000	10	10	
ADUC831	8052 (12-clk)		1.3	62	2304	34	12	247	8	12	2
ADUC8x2	8052 (12-clk)		1.3	8/62	256/2304	34	12	200/247	8	12	2
ADUC814	8052 (12-clk)		1.3	8	256	17	12	247	6	12	2
ADUC8x6	8052 (12-clk)		1...1.3	8/62	256/2304	34	16	0.105	4	12	1
ADUC824,34	8052 (12-clk)		1	8/62	256/2304	34	24	0.105	4	12	1
ADUC841,2,3	8052 (1-clk)		20	62	2304	34	12	400	8	12	2
ADUC845,7,8	8052 (1-clk)		12	62	2304	34	16/24	1.37	10	12	1
Atmel											
ATmega8,16,32HVx	AVR	4/8		8,16,32	512...2048	6/12	12		5/7	-	-
ATxmega16...384	AVR	32		16...384	2k...32k		12	2000	16	12	2/4
AT32UC3L0xx	AVR32	64	50	16...64	16	36	12*		9	-	-
Freescale											
56F801x,56F802x	56800E	32	32	12...16	4096	26...35	12	2670	8	-	-
Maxim											
MAXQ2010	MAXQ	10		64	2048		12	312.5	8	-	-
Microchip											
dsPIC30F201x, dsPIC30F301x	PIC		30	12...24	1024...2048	12...20	12	200	8/10	-	-
dsPIC33FJx2GP2xx	PIC		40	12	1024	13...21	12	500	6...13	-	-
PIC24HJ12x, PIC24HJ16x, PIC24HJ32x	PIC		16...40	12...32	1024...4096	13...35	12	500	6...13	-	-
SILABS											
C8051F00x	8051		20/25	32	256/2304	8...32	12	100	4...8	12	2
C8051F02x	8051		25	64	4352	32/64	12	100	8	12	2
C8051F04x	8051		25	64	4352	32/64	12	100	13	12	2
C8051F06x	8051		25	64	4352	24/59	16	1000	1	12	2
C8051F12x	8051		50...100	128	8448	32/64	12	100	8	12	2
C8051F350,1	8051		50	8	768	17	24	1	8	8	2
C8051F352,3	8051		50	8	768	17	16	1	8	8	2
Texas Instruments											
MSC1200xx	8051			4...8	256	16	24	1	8	8	1
MSC1202xx	8051			4...8	256	16	16	1	6	8	1
MSC1210xx	8051			4...32	1280	34	24	1	8	-	-
MSC121xxx	8051			4...32	1280	34	24	1	8	16	4

nienia 1,5 ppm/°C. W torze pomiarowym mikrokontrolerów Texasa jest oprócz samego przetwornika sigma-delta multiplexer sygnałów analogowych, bufor i wzmacniacz o programowalnym wzmacnieniu (1...128). Dodatkowym sygnałem analogowym jest sygnał napięciowy z wewnętrznej czujnika temperatury. Wśród peryferiów cyfrowych, układy te mają interfejsy I<sup>2</sup>C (poza MSC1210, MSC1212 i MSC1214), SPI i UART, 16-bitowy modulator PWM, *watchdog* oraz obwody wykrywania zbyt niskiego napięcia zasilania.

Analog Devices, firma słynąca z podzespołów analogowych, ma również w ofercie układy z rdzeniem 8051. Są to zarówno jednostki o 12 cyklach zegarowych na cykl maszynowy (ADUC81x, ADUC82x i ADUC83x) jak i układy, w których zastosowano nowoczesną architekturę z jednym cyklem maszynowym na cykl zegarowy (ADUC84x). Większość mikrokontrolerów ADUC8xx ma 12-bitowy przetwornik A/C SAR. Układy ADUC816, ADUC836 i ADUC848 mają 16-bitowy, a ADUC824, ADUC834 i ADUC845,7 24-bitowy przetwornik sigma-delta. Wszyst-



kie układy, poza ADUC843, mają jedno- lub dwukanałowy przetwornik C/A.

**Nie tylko 8051**

Wiele firm ma w ofercie mikrokontrolery z przetwornikami A/C o zwiększonej do 12 bitów lub więcej rozdzielczości. Takie mikrokontrolery mają w swojej ofercie również: Atmel, Analog Devices, Microchip, SiLabs.

W ofercie Atmela, w rodzinach ATmega (mikrokontrolery serii Battery Management - (ATmega16HVA,B, ATmega32HVB i ATmega8HVA), XMega oraz AVR32, znajdziemy mikrokontrolery z przetwornikami 12-bitowymi. Należy zauważyć, że układy z serii Battery Management nie mają komparatora analogowego. Mikrokontrolery AVR32 mają przetworniki 10-bitowe, które mogą pracować w trybie rozszerzonej do 11- lub 12-bitów rozdzielczości. Jednak dodatkowe bity są interpolowane. Rozdzielczość 11-bitów uzyskuje się poprzez sprzętowe uśrednianie 4 próbek przetwornika A/C, a 12-bitów 16. Prędkość przetwarzania dla tych trybów jest mniejsza, odpowiednio 4- lub 16-krotnie.

Warto zwrócić uwagę na przetworniki A/C zastosowane w mikrokontrolerach XMega. Prędkość próbkowania w tych przetwornikach wynosi 2 MS/s. Podobnie do innych rozwiązań, przetworniki tych mikrokontrolerów mają multiplexer sygnałów analogowych, wzmacniacz o programowalnym wzmocnieniu, a wejścia mogą pracować w trybie niesymetrycznym lub różnicowym. Napięciem odniesienia może być wewnętrzne napięcie 1,6 V (z zasilania  $V_{CC}$ ), napięcie z zewnętrznego źródła lub napięcie z wewnętrznego źródła napięcia odniesienia 1 V. Przetworniki C/A mikrokontrolerów XMega mają szybkość próbkowania 1 MS/s.

Producentem mikrokontrolerów z przetwornikami 10/12-bitowymi jest firma także Microchip, która ma w swojej ofercie układy PIC24 i dsPIC (dsPIC30 ma tylko przetwornik 12-bitowy). W trybie 10-bitowym zastosowany w nich przetwornik może pracować z większą prędkością próbkowania (1,1 MS/s) niż podana w **tab. 1**. Natomiast w trybie 12-bitowym prędkość przetwarzania wynosi 500 kS/s, jednak dostępny jest tylko jeden wzmacniacz pamiętajaco-próbkujący. Nie jest więc możliwe naprzemienne próbkowanie z kilku kanałów.

Interesującą architekturą ma mikrokontroler MAXQ2010, w którym oprócz 12-bitowego przetwornika A/C typu SAR wbudowano kontroler 160-segmentowego wyświetlacza LCD. Rdzeniem tego mikrokontrolera jest MAXQ – 16-bitowa jednostka obliczeniowa typu RISC, w której zaimplementowano sprzętowe instrukcje MAC. Dzięki temu operacje mnożenia dwóch 16-bitowych liczb są wykonywane w jednym cyklu zegarowym. Układ pobiera prąd o natężeniu typowo 1 mA przy częstotliwości sygnału taktującego 1 MHz i napięciu zasilania 2,7 V oraz 380 nA w trybie Stop.

Firmą, w ofercie której znajdują się, podobne do opisywanych wyżej, mikrokontrolery jest Freescale. Oferuje głównie układy

rowego 41,78 MHz). Może on pracować w trybie: różnicowym, pseudo różnicowym i niesymetrycznym. W trybie pseudo różnicowym kanał ujemny jest dołączony do wewnętrznego sygnału  $V_{IN-}$ , natomiast w trybie różnicowym oba kanały pomiarowe (ujemny i dodatni) są podawane z multiplexera. Zakres pomiarowy przetwornika wynosi  $0...V_{REF}$  ( $V_{REF}$  jest napięciem odniesienia) w trybie niesymetrycznym lub  $0...2 \times V_{REF}$  w trybie różnicowym. Napięcie odniesienia może być podawane z wewnętrznego źródła (2,5 V) lub zewnętrznego źródła dołączonego do końcówki VREF.

Układy oznaczone symbolami AUDC701x i ADUC702x mają dwa, trzy lub cztery wyjścia 12-bitowego przetwornika C/A.

Oprócz peryferiów analogowych, mikrokontrolery mają również peryferia cyfrowe. Jednym z nich jest trójfazowy modulator PWM. Może on być użyty do sterowania indukcyjnych silników na prąd przemienny. Modulator generuje zmodulowany sygnał PWM na 3 parach wyjść, po trzy typu High-Side i Low-Side.

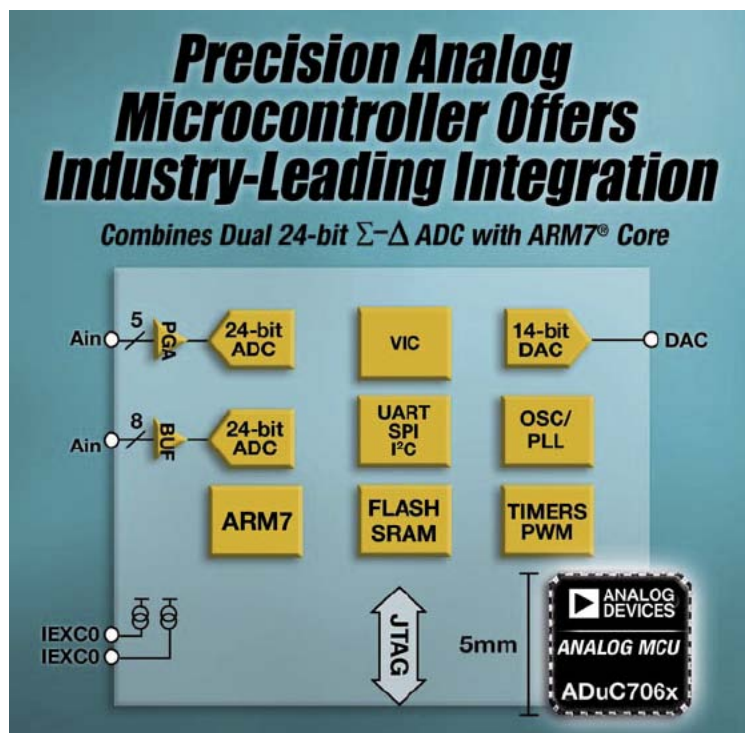
W mikrokontrolerach ADUC7xxx jest wbudowana prosta matryca PLA. Złożona jest z dwóch niezależnych bloków PLA, z których każdy ma 8 komórek. Komórka PLA ma pamięć generowania termów (Lookup Table) z dwoma wejściami oraz przetrzutnik.

**Podsumowanie**

Wśród mikrokontrolerów z wejściami analogowymi przeważają układy z 12-bitowymi przetwornikami A/C typu SAR. Większe rozdzielczości przetworników wskazują na użycie modulatora sigma-delta. Mikrokontrolery z 16-bitowymi lub dokładniejszymi przetwornikami mają w swojej ofercie firmy SiLabs, Texas Instruments oraz Analog Devices. Zaletą przetworników 12-bitowych jest z pewnością większa prędkość przetwarzania (Atmel, Freescale).

Do prostszych obliczeniowo zadań doskonale nadadzą się mikrokontrolery z rdzeniem 8051, które często pomimo mniejszej wydajności charakteryzują się mniejszym poborem energii. Do bardziej wymagających aplikacji można rozważyć wybór 16- lub 32-bitowego mikrokontrolera, np. z rdzeniem ARM (Analog), AVR32 (Atmel) lub 56800 (Freescale).

**Maciej Gołaszewski, EP**  
[maciej.golaszewski@ep.com.pl](mailto:maciej.golaszewski@ep.com.pl)



typu DSC, czyli łączące funkcjonalność mikrokontrolerów z możliwościami obliczeniowymi procesorów DSP.

Są to 16-bitowe układy z rodzin 56F802X, 56F801X z dodatkowym interfejsem LIN. Cechą charakterystyczną jest krótki czas konwersji, dzięki któremu uzyskują one częstotliwość próbkowania 2670 kS/s. Mikrokontrolery 56F80xx są wyposażone w dwa przetworniki A/C. Każdy z nich może obsłużyć do 4 kanałów analogowych.

**Analogowe ARMY**

Podobnie jak w układach z rdzeniem 8051, większość analogowych mikrokontrolerów ADUC7xxx firmy Analog Devices z rdzeniem ARM7TDMI została wyposażona w przetwornik A/C typu SAR o rozdzielczości 12 bitów i prędkości próbkowania 1 MS/s (przy częstotliwości sygnału zega-