

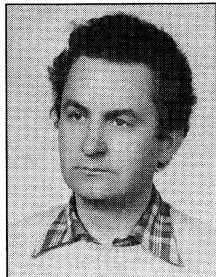
Janusz JANICZEK, Andrzej STĘPIEŃ

POLITECHNIKA WROCLAWSKA  
KATEDRA METROLOGII ELEKTRONICZNEJ I FOTONICZNEJ

## Właściwości przetworników analogowo-cyfrowych implementowanych w mikrokontrolerach

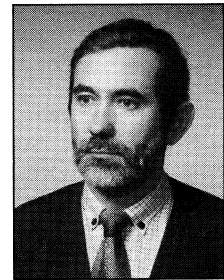
Dr inż. Janusz JANICZEK

– jest absolwentem Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Tematyka pracy magisterskiej, jak i pracy doktorskiej była związana z konstrukcją przetworników analogowo-cyfrowym, zwłaszcza z kształtowaną charakterystyką do korekcyjnej nieliniowości charakterystyk czujników pomiarowych. Późniejsze prace i publikacje są głównie kontynuacją tej tematyki, zwłaszcza korekcyjnej wieloparametrowej. Jest autorem kilkunastu patentów dotyczących metod i układów kształtowania charakterystyk przetwarzania przetworników analogowo-cyfrowych oraz układów do pomiaru wartości skutecznej i mocy. Ponadto zajmuje się zastosowaniem techniki mikroprocesorowej oraz mikrokontrolerów w konstrukcji aparatury pomiarowej. Jest pracownikiem Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej, gdzie prowadzi działalność dydaktyczną w zakresie aparatury pomiarowej.



Dr inż. Andrzej STĘPIEŃ

– jest absolwentem Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Tematyka pracy magisterskiej, jak i pracy doktorskiej związana była z pomiarami napięć i przetwarzaniem analogowo-cyfrowym w cyfrowych przyrządach pomiarowych. Późniejsze prace i publikacje związane są z dalszą poprawą parametrów metrologicznych i nowymi możliwościami cyfrowych przyrządów pomiarowych w kontekście coraz powszechniejszego zastosowania techniki mikroprocesorowej oraz mikrokontrolerów. Jest pracownikiem Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej. W ramach szerokiej działalności dydaktycznej propaguje nowe techniki i technologie w metrologii.



### Streszczenie

W artykule przedstawiono problemy występujące przy połączeniu przetwornika A/C mikrokontrolera z obiektem, wpływ czasu próbkowania i parametrów wejściowych przetwornika na dokładność przetwarzania, sposób automatyzacji pomiarów, wymagania kompilatora C dotyczące zapisu wyniku pomiaru i wpływ struktury wewnętrznej na działanie przetwornika.

### Abstract

The article shows problems occur while connecting microcontroller's A/D converter to object, effect of sample time and converter's input parameters on accuracy, measurement's automatization, C compiler requirements on measurement's result record and influence of internal microcontroller's structure.

Przetworniki analogowo-cyfrowe implementowane w mikrokontrolerach można ocenić biorąc pod uwagę następujące parametry lub funkcje:

- rozdzielczość i dokładność przetwarzania,
- czas próbkowania i przetwarzania mierzonego sygnału,
- parametry wejściowe takie jak: pojemność wejściową, rezystancję analogowych kluczy itp., parametry determinujące rezystancję źródła mierzonego napięcia,
- automatyzację pomiarów, możliwość wykonywania pojedynczego lub wielokrotnego pomiaru, liczbę analogowych kanałów wejściowych,
- sposób zapisu wyniku przetwarzania, zwłaszcza dla przetworników o rozdzielczości większej niż 8 bitów,
- metodę przetwarzania analogowo-cyfrowego,
- wewnętrzną konstrukcję i wewnętrzne układy mikrokontrolera wpływające na dokładność przetwarzania przetwornika analogowo-cyfrowego,
- jakość połączeń na płycie drukowanej, sposób zasilania procesora i przetwornika.

Ramy artykułu pozwalają tylko na wybiórcze omówienie niektórych aspektów wykorzystania przetworników analogowo-cyfrowych implementowanych w mikrokontrolerach. Autorzy nie zamierzają dokonywać oceny jakości przetworników A/C różnych producentów, a jedynie zwrócić uwagę na niektóre problemy. Problemy, które mogą być źródłem kłopotów przy projektowaniu systemu pomiarowego i oprogramowania sterującego tym systemem.

### Rozdzielczość i dokładność przetwarzania

Najważniejszym, często jedynym brany pod uwagę parametrem jest rozdzielczość przetwornika analogowo-cyfrowego. Wynika to z tego, że najczęściej dla przetworników konwencjonalnych ich podstawowe błędy mieszczą się w zakresie  $\pm 0.5$  LSB lub  $\pm 1$  LSB. Tak się również zakłada w przypadku, gdy producent mikrokontrolera z przetwornikiem A/C nie podaje danych metrologicznych przetwornika A/C, co nie zawsze jest zgodne z rzeczywistością. Może się również okazać, że przetwornik posiada dużą rozdzielczość, ale parametry metrologiczne przetwornika (liniowość, błąd zakresu, itp.) podawane przez producenta wskazują na znacznie mniejszą dokładność niż wynikałoby to z rozdzielczości. Przykładem może być przetwornik A/C o rozdzielczości 14 bitów zaimplementowany w procesorze MSP430C325 [1], którego błąd nieliniowości dochodzi do  $\pm 10$  LSB. Producent zwraca uwagę, że tak duża rozdzielczość może być wykorzystana w pomiarach różnicowych, przy których błędy przetwornika będą odgrywały mniejszą rolę.

W dostępnych na rynku mikrokontrolerach graniczną rozdzielczością przetworników A/C jest rozdzielczość 10 bitów, wyjątkowo 14 bitów we wspomnianym wyżej mikrokontrolerze. Wynika to z pewnej sprzeczności konstrukcyjnej dwóch pozornie niezależnych struktur:

- precyzyjnej struktury przetwornika A/C pracującej z napięciami o małych poziomach, np. klucze analogowe i komparatory,
- szybko działającej struktury cyfrowej z napięciami o poziomie o kilka rzędów wyższych niż występujące w części analogowej.

Połączenie tych dwóch struktur może powodować dodatkowe błędy przetwarzania przetworników A/C. Na przykład uruchomienie w niektórych mikrokontrolerach Watchdoga powoduje niestabilność przetwarzania przetwornika rzędu 1 LSB. Pominąć należy błędy spowodowane wadliwą konstrukcją przetwornika lub innych układów mikrokontrolera współpracujących z przetwornikiem. Taka sytuacja miała miejsce w mikrokontrolerze 8xC51GB, w którym wyniki pomiarów przeprowadzane w kanale 4 przy niskiej temperaturze, wysokim napięciu zasilającym Vcc i wysokiej częstotliwości taktowania procesora były niewłaściwe.

### Czas przetwarzania - parametry wejściowe przetwornika A/C

Czas przetwarzania przetwornika analogowo-cyfrowego  $T_P$  jest podawany najczęściej jako liczba cykli maszynowych mikrokontrolera  $T_{CM}$ . Czas ten jest sumą czasu:

- próbkowania mierzonego napięcia  $T_P$ ,
- konwersji wartości mierzonego sygnału na odpowiadający kod binarny  $T_C$ ,
- przesłania wyniku przetwarzania do rejestru lub rejestrów wyniku  $T_W$ .

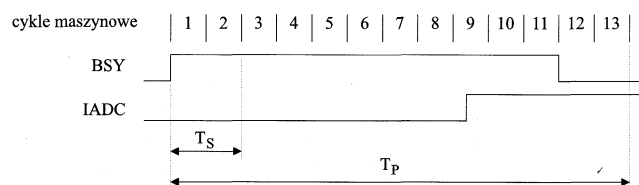
Poza czasem próbkowania  $T_S$ , który ogranicza dynamikę zmian mierzonego sygnału i bardzo krótkim, często nie podawanym czasem przesłania wyniku  $T_W$ , czas przetwarzania  $T_P$  jest zdeterminowany czasem konwersji  $T_C$ . W tabelicy 1 przedstawiono czasy przetwarzania  $T_P$  i próbkowania  $T_S$  dla wybranych typów mikrokontrolerów.

**Tabela 1.** Czasy przetwarzania  $T_P$  i próbkowania  $T_S$  dla wybranych mikrokontrolerów

typ mikrokontrolera	rozdzielczość przetw. [bity]	$T_P$ [cykle masz.]	$T_S$ [cykle masz.]	$T_{CM}$ [Tosc]
8xC552	10	50	8	12
8xC515/517	8	13	2	12
MSP430x320	12/14	96/132	12	N

Krótkim czasem przetwarzania jest czas rzędu kilkunastu cykli maszynowych, taki jaki występuje w mikrokontrolerach 8xC515/517 [2]. Długim czasem przetwarzania jest czas rzędu kilkuset cykli maszynowych, np. w procesorze MSP430x320 [1].

Jeśli przetwornik analogowo-cyfrowy charakteryzuje się krótkim czasem przetwarzania, to konstruktorzy dodatkowo zabiegają aby zarówno programowa jak i sprzętowa obsługa przetwornika odbywały się bez dodatkowych strat. Taka sytuacja występuje w mikrokontrolerach 8xC515/517 firmy Siemens [2]. W przypadku programowego testowania znacznika końca pomiaru BSY (Busy), znacznik ten staje się nieaktywny 2 cykle maszynowe przed faktycznym zakończeniem przetwarzania (rysunek 1). Czas ten wynika z czasu trwania stosowanej instrukcji testującej znaczniki.

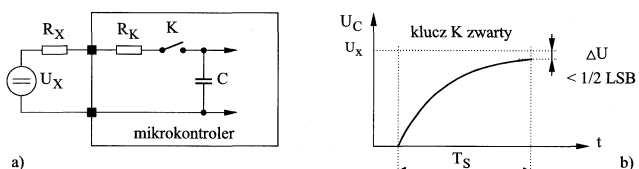


**Rys. 1.** Zależność czasu przetwarzania przetwornika A/C od liczby cykli maszynowych mikrokontrolera 8xC51x

W przypadku sprzętowej obsługi przetwornika A/C przez przetwarzania, znacznik końca przetwarzania IADC (Interrupt A/D Converter) uaktywniany jest 5 cykli maszynowych przed końcem przetwarzania. To przyspieszenie początku obsługi przetwarzania przetwornika wynika z czasu opóźnienia rozpoczęcia tej procedury.

Schemat zastępczy wejściowej części analogowej przetwornika A/C dołączonego do źródła mierzonego napięcia  $U_X$  przedstawiono na rysunku 2. Poszczególne elementy symbolizują:

- $R_X$  - rezystancję wewnętrzną mierzonego źródła napięcia,
- $R_K$  - rezystancję kluczy analogowych wejściowego multipleksera przetwornika,



**Rys. 2.** Schemat zastępczy układu pomiaru napięcia (a) i zależności czasowej w trakcie próbkowania mierzonego napięcia (b)

- $C$  - pojemność układu próbkująco-pamiętającego,
- przełącznik  $K$  w stanie zwarcia (czas próbkowania  $T_S$ ) powoduje naładowanie pojemności  $C$  do wartości mierzonego napięcia  $U_X$ .

Z pomiarowego punktu widzenia od czasu próbkowania  $T_S$  zależy precyzja działania przetwornika A/C:

- zbyt krótki czas próbkowania i zbyt duża stała czasowa  $(R_X + R_K) \cdot C$  powoduje, że kondensator  $C$  nie zdąży się naładować do wartości mierzonego napięcia  $U_X$ ; ponieważ parametry przetwornika są narzucone konstrukcyjnie, dlatego aby uzyskać zadaną dokładność pomiaru należy ograniczyć rezystancję źródła mierzonego napięcia do wartości kilku, kilkunastu  $k\Omega$  [1, 3],
- ograniczony czas próbkowania  $T_S$  ogranicza także dynamikę zmian mierzonego sygnału zgodnie z zależnością:

$$dV/dt \leq 1/2 \text{ LSB } (T_S)^{-1}$$

Uzyskanie założonej dokładności przetwarzania nie będzie możliwe jeśli niewłaściwie zostanie zaprojektowana płytka drukowana. Najlepsze efekty uzyskuje się spełniając założenia podane w [1 i 3]. Najogólniej sprowadzają się one do:

- rozdzielenia zasilania części analogowej i cyfrowej,
- właściwego filtrowania obu napięć zasilających przy użyciu elementów LC,
- właściwego laminatu i poprowadzenia ścieżek drukowanych w taki sposób aby wyeliminować dodatkowe pętle, które mogą stać się antenami odbierającymi zakłócenia,
- przemyślanego dołączenia czujników pomiarowych do wejść przetwornika A/C.

### Automatyzacja pomiarów

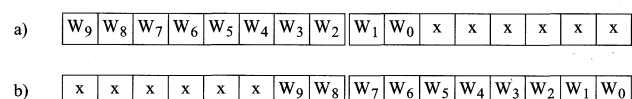
Przetworniki implementowane w mikrokontrolerach posiadają kilka wejść analogowych, przeważnie od 4 do 12. Tylko w najstarszych mikrokontrolerach obsługa wejść analogowych realizowana jest wyłącznie programowo. W nowszych wersjach istnieje możliwość wykonywania serii pomiarów dla zadanego kanału lub grupy kanałów. Przykładowo w mikrokontrolerze 8xC576 firmy Philips, który posiada 6-kanałowy, 10-bitowy przetwornik A/C, automatyka przetwornika umożliwia zaprogramowanie, wykonanie:

- pojedynczego pomiaru w wybranym, pojedynczym kanale,
- pojedynczego pomiaru w zadanych kanałach,
- serii 6 pomiarów w wybranym, pojedynczym kanale,
- serii n pomiarów w zadanych kanałach.

Uproszczenie sterowania przetwornika A/C pociąga za sobą wzrost złożoności struktury wewnętrznej mikrokontrolera i często nieprzewidziane sytuacje, jaka wystąpiła w opisanym już mikrokontrolerze 8xC51GB firmy Intel.

### Sposób zapisu wyniku przetwarzania

Problem ten należy powiązać z wewnętrzną strukturą danych mikrokontrolera. W 8-bitowych procesorach wymiana danych pomiędzy wewnętrznymi układami realizowana jest bajtowo, a w procesorach 16-bitowych przesyłane są równocześnie dwa bajty. Z tego powodu jeśli w procesorze 8-bitowym stosowany jest przetwornik analogowo-cyfrowy o rozdzielczości większej niż 8-bitów, to do zapisu wyniku przetwarzania konieczne są dwa bajty. W stosowanych mikrokontrolerach przyjęte zostały dwa sposoby zapisu 2-bajtowego wyniku przetwarzania (rysunek 3). Oznacze-

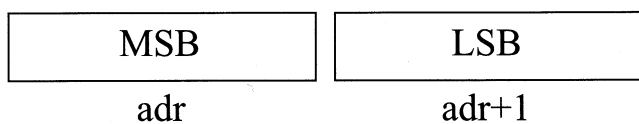


**Rys. 3.** Sposoby zapisu 10-bitowego wyniku przetwarzania

nie X sygnalizuje, aby nie interpretować tej wartości. Z praktycznego punktu widzenia najlepszym rozwiązaniem byłyby zerowe wartości tych bitów. Niestety w wielu rozwiązaniach mikrokontrolerów należy wynik poddać dodatkowemu procesowi maskowania, w celu wyzerowania niepożądanych bitów.

Rozwiązania przedstawione na rysunku 3 mają swoje wady i zalety. W zapisie typu a) łatwiejsza jest ocena wyniku tylko na podstawie 8-bitowej wartości w stosunku do zapisu typu b). Biorąc pod uwagę wykorzystywane instrukcje mikrokontrolerów, łatwiejsze są obliczenia numeryczne przy zapisie typu b). Na przykład przy obliczaniu wartości średniej z serii pomiarów przy zapisie typu a) konieczne są dodatkowe operacje normalizujące wynik, np. do postaci typu b).

Innym problemem, który może wystąpić w trakcie przygotowywania oprogramowania jest zgodność zapisu 2-bajtowego wyniku przetwarzania ze sposobem zapisu zmiennych w wykorzystywanym kompilatorze C (rysunek 4). Podana struktura zapisu charakterystyczna jest dla większości kompilatorów dostępnych na rynku.



Rys. 4. Zapis 2-bajtowej zmiennej typu integer w kompilatorze C

0	1	2	3	4	5	
ADC0L	ADC1L	ADC2L	ADC3L	ADC4L	ADC5L	nazwa rejestru
09Ah	09Bh	09Ch	09Dh	09Eh	09Fh	adres rejestru
ADC0H	ADC1H	ADC2H	ADC3H	ADC4H	ADC5H	nazwa rejestru
0AAh	0ABh	0ACh	0ADh	0AEh	0AFh	adres rejestru

Rys. 5. Adresy rejestrów specjalnych zawierające wyniki pomiarów w 6 kanałach w mikrokontrolerze 8xC576 firmy Philips

Zapis zmiennej typu integer (signed/unsigned short/int) w kompilatorze C wymaga, aby wynik pomiaru zapisany był w dwóch kolejnych bajtach, w formacie przedstawionym na rysunku 3b. W niektórych mikrokontrolerach wyposażonych w automatykę przetwornika A/C (np. 8xC576 firmy Philips) wyniki pomiarów zapisywane są w rejestrach zgrupowanych w dwóch blokach, tak jak przedstawiono to na rysunku 5 Część bardziej znaczącą rejestru oznaczono literą H, część mniej znaczącą - literą L.

Przedstawiona sytuacja wyraźnie wskazuje, że istotny jest nie tylko właściwy dobór mikrokontrolera i przetwornika analogowo-cyfrowego, ale także bibliotek arytmetycznych i języka programowania.

### Wewnętrzna konstrukcja mikrokontrolera

Każdej zmianie stanów logicznych towarzyszy mniejsza lub większa zmiana prądu zasilania, którego wartość zależy między innymi od technologii wykonania mikrokontrolera, napięcia zasilającego oraz jakości wewnętrznych i zewnętrznych połączeń. Tego typu zakłócenia rozprzestrzeniają się przez indukcyjności, pojemności i rezystancje pasozytnicze (np. podłoże) wewnątrz całej struktury układu scalonego. Biorąc pod uwagę tylko część cyfrową, amplituda zakłóceń nie powinna przekraczać wartości około 0,8..1,5

V w zależności od wartości napięcia zasilającego mikrokontroler. Należy również pamiętać, że małe wartości pojemności pasozytniczych sprzyjają szybkozmiennym zakłóceniom. Im wyższa częstotliwość zmian, a praktyka na to wskazuje, podwyższaniu częstotliwości taktującej mikrokontroler towarzyszy łatwiejsze rozprzestrzenianie zakłóceń. Dynamika zmian stanów logicznych ma swoje odzwierciedlenie w zmianie wartości prądu zasilającego mikrokontroler. Sposób wykonania wewnętrznych doprowadzeń napięcia zasilającego może zmniejszyć lub zwiększyć chwilowe wartości prądu zasilania [4]. Najwyraźniej to widać w sposobie zasilania szybkich układów cyfrowych, w których zastępuje się zasilanie skrajnych doprowadzeń na rzecz zasilania centralnego [5].

Jeśli przetwornik analogowo-cyfrowy ma osiągnąć zadaną rozdzielczość, to wartość napięcia zakłóceń nie powinna przekraczać 1/2 LSB, tzn. połowy wartości podanych w tabelicy 2. Należy pamiętać, że zarówno przetwornik analogowo-cyfrowy jak i część cyfrowa mikrokontrolera wykonywane są w tej samej strukturze, dlatego dopuszczalna wartość zakłóceń części cyfrowej jest nie do przyjęcia dla poprawnej pracy przetwornika analogowo-cyfrowego.

Tablica 2. Wartość 1 LSB dla różnej rozdzielczości przetworników i różnych wartości napięcia wzorcowego  $V_{ref}$

napięcie wzorcowe $V_{ref}$ [V]	rozdzielczość			
	8 bitów [mV]	10 bitów [mV]	12 bitów [mV]	14 bitów [mV]
5	19,6	4,89	1,22	0,305
3,6	14,1	3,52	0,88	0,220
3,3	12,9	3,23	0,81	0,201
2,7	10,6	2,64	0,66	0,165

Kolejnym, niemniej ważnym problemem jest rozdzielenie zasilania części cyfrowej od części analogowej (przetwornika A/C). Ta cecha konstrukcyjna zmniejsza przenikanie zakłóceń po wewnętrznych ścieżkach zasilających. Ze względu na to samo podłoże układu scalonego różnice napięć zasilających nie powinny być zbyt duże. W bardzo niewielu procesorach konstruktorzy zdecydowali się na takie rozwiązanie.

### Podsumowanie

Nie ma idealnego mikrokontrolera z doskonałym przetwornikiem analogowo-cyfrowym. Każdy układ ma swoje zarówno dobre, ale i złe cechy. Zadaniem projektanta systemu pomiarowego jest właściwy wybór typu mikrokontrolera w celu osiągnięcia zadanych parametrów. W wielu przypadkach zamiast poszukiwań właściwego, nowego mikrokontrolera sensowniejsze jest połączenie znanego procesora, znanego środowiska i zewnętrznego przetwornika A/C. Takie rozwiązanie daje możliwość właściwego kształtowania zarówno parametrów metrologicznych i obliczeniowych.

### Literatura

- [1] MSP430 Family. 14-Bit Analog-to-Digital Converter. Optimum Use of the Analog-to-Digital Converter. Application Report. Texas Instrument, 1998.
- [2] SAB 80C517/80C537. 8-bit CMOS Single-Chip Microcontroller. User's Manual. Siemens A.G. 10.92.
- [3] T. van DAELE: Using the Analog-to-Digital Converter of the 8xC552 Microcontroller. Application Note EIE/AN93017. Philips Semiconductors, 1994.
- [4] Digital Design Seminar. Reference Manual. SDYDE01A. Texas Instruments, 1997.
- [5] Application of Advanced High Speed CMOS (AHC) Circuits. Application Report. Advanced System Logic Products. SCLA012. Texas Instruments 1997.