

## Bogusław JACKIEWICZ

PRZEMYSŁOWY INSTYTUT ELEKTRONIKI

# Przetworniki analogowo-cyfrowe w nowoczesnych systemach pomiarowych

dr inż. Bogusław Jackiewicz

Był wieloletnim pracownikiem Zakładu Elektronicznej Aparatury Pomiarowej MERATRONIK, gdzie rozwijał produkcję woltomierzy i multimetrów cyfrowych. Od roku 1993 kieruje Samodzielną Pracownią Układów Cyfrowych Przemysłowego Instytutu Elektroniki, współpracując z krajowym producentem multimetrów cyfrowych, jakim jest obecnie Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Metrologii Elektrycznej METROL w Zielonej Górze.



### Streszczenie

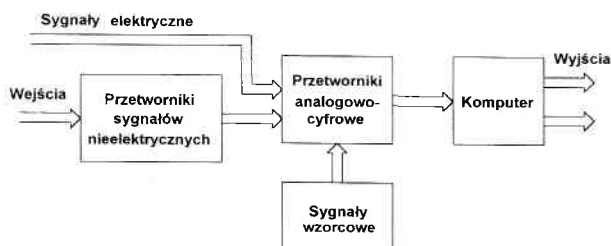
W artykule przedstawiono metody przetwarzania analogowo-cyfrowego, stosowane w nowoczesnych systemach pomiarowych. Szczególną uwagę poświęcono trzem głównym metodom konwersji sygnałów w dziedzinie amplitudy: przetwarzaniu z równoczesną komparacją, przetwarzaniu z wagową komparacją i przetwarzaniu z nadpróbkowaniem z wykorzystaniem modulatorów sigma-delta. Przedstawiono zalety i wady wymienionych metod przetwarzania i zakresy ich zastosowań w systemach pomiarowych.

### Abstract

Methods of analog to digital conversion used in modern measurement systems are described in the paper. Particular attention was given to three main methods of signal conversion in amplitude domain: parallel flash converters, successive approximation converters and oversampling sigma-delta converters. The advantages and disadvantages of each method of conversion and area of their application in measurement systems are presented.

### Wstęp

Większość sygnałów charakteryzujących mierzone obiekty i zjawiska ma charakter analogowy, natomiast komputery, wchodzące w skład współczesnych systemów pomiarowych, są przystosowane do przetwarzania wyłącznie sygnałów cyfrowych. Sygnały analogowe są sygnałami ciągłymi pod względem czasu i amplitudy. Sygnały cyfrowe uzyskuje się z sygnałów analogowych przez próbkowanie w określonych przedziałach czasowych i kwantowanie amplitudy próbek na dyskretne poziomy. Kwantowanie w dziedzinie czasu jest dokonywane za pomocą układów próbkujących, natomiast w dziedzinie amplitudy – za pomocą przetworników ana-



Rys. 1. Struktura typowego systemu pomiarowego.

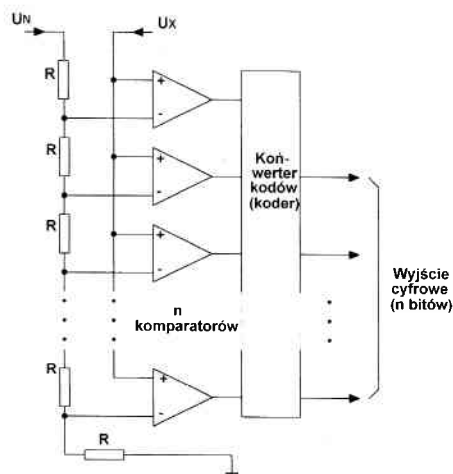
logowo-cyfrowych, przy czym często przetworniki mogą również pełnić funkcję układów próbkujących. Tak więc przetworniki analogowo-cyfrowe są niezbędnymi składnikami wszystkich współczesnych systemów pomiarowych.

Realizacja efektywnych systemów pomiarowych wymaga dytalizacji mierzonych sygnałów możliwie blisko miejsca ich powstawania (rys. 1), co wiąże się z koniecznością stosowania odpowiednio sprawnych przetworników analogowo-cyfrowych. Należy podkreślić, że podstawowa część procesu pomiarowego, jakim jest porównywanie mierzonego sygnału z sygnałem wzorcowym jest dokonywana właśnie wewnątrz przetwornika analogowo-cyfrowego, co sprawia, że możliwości i ograniczenia tego przetwornika w decydującej mierze determinują parametry metrologiczne całego systemu. Dlatego znajomość mechanizmów działania i umiejętność wykorzystywania specyficznych właściwości poszczególnych rodzajów przetworników jest niezbędnym warunkiem budowania i użytkowania dobrych systemów pomiarowych.

Dokonany w ciągu ostatniego dziesięciolecia rozwój technologii scalonych układów cyfrowych spowodował istotną zmianę w dziedzinie przetwarzania analogowo-cyfrowego. Decydujący wpływ na konstrukcję przetworników obecnie wywierają wymagania dotyczące szybkości przetwarzania [1]. Przetworniki o największej szybkości działają w oparciu o zasadę równoczesnej komparacji, natomiast przetwarzanie sygnałów wolnozmiennych stało się domeną przetworników nadpróbkujących. Pozostałe, do niedawna bardzo popularne sposoby przetwarzania analogowo-cyfrowego, wykorzystujące przetwarzanie amplitudy na częstotliwość, dwukrotne całkowanie i ich kolejne modyfikacje, praktycznie nie są już stosowane w systemach pomiarowych.

### Przetworniki z równoczesną komparacją

Zasadę działania jednostopniowego przetwornika analogowo-cyfrowego z równoczesną komparacją<sup>1</sup> przedstawiono na rys. 2. Przetwornik o długości słowa wyjściowego  $n$  bitów powinien zawierać  $(2^n - 1)$  komparatorów, porównujących amplitudę sygnału



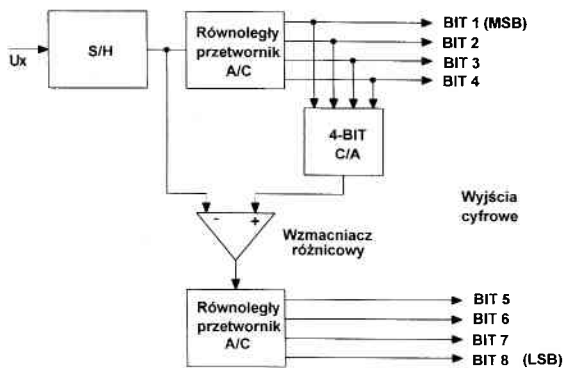
Rys. 2. Jednostopniowy przetwornik analogowo-cyfrowy z równoczesną komparacją.

<sup>1</sup> Przetworniki z równoczesną komparacją (ang. flash converters) są również nazywane w polskim piśmiennictwie „przetwornikami fleszowymi” [2].

wejściowego  $U_x$  z odpowiednimi częściami napięcia odniesienia  $U_N$ , uzyskiwanymi z kolejnych wyjść dzielnika, złożonego z  $n$  jednakowych rezystorów. Liniowy (termometryczny) kod sygnałów wyjściowych poszczególnych komparatorów jest przekształcany na kod dwójkowy za pomocą odpowiedniego konwertera cyfrowego.

Zaletą przetwornika z równoczesną komparacją jest duża szybkość działania, wynikająca z braku układów sekwencyjnych, natomiast podstawowymi wadami – znaczny pobór mocy oraz duże wymiary struktury, szybko rosnące przy powiększaniu rozdzielczości. Budowa przetwornika o długości słowa 8 bitów wymaga zastosowania 255 komparatorów, przy czym powiększenie rozdzielczości o każdy dodatkowy bit pociąga za sobą dwukrotny wzrost liczby niezbędnych elementów. Z tego względu zasada równoczesnej komparacji jest wykorzystywana tylko do budowy najszybszych przetworników o rozdzielczości nie przekraczającej 8...10 bitów.

Przetworniki o rozdzielczości przekraczającej 8 bitów wymagają stosowania dwustopniowej komparacji (rys. 3). Cykl przetwarzania takich przetworników składa się z dwóch faz. W pierwszej



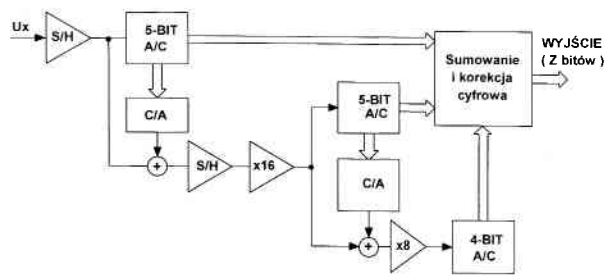
Rys. 3. Dwustopniowy przetwornik z równoczesną komparacją.

fazie za pomocą równoczesnego przetwornika analogowo-cyfrowego ustalana jest wartość kilku (w przykładzie przedstawionym na rys. 3 – czterech) najbardziej znaczących bitów wyniku. Wynik pierwszego przetwarzania jest za pomocą pomocniczego przetwornika cyfrowo-analogowego (C/A) zamieniany na odpowiadającą mu wartość sygnału analogowego i odejmowany od sygnału wejściowego. Sygnał różnicy jest przetwarzany za pomocą drugiego (w przedstawionym przykładzie również cztero-bitowego) równoczesnego przetwornika cyfrowo-analogowego, tworząc mniej znaczącą część bitów wyniku.

W przypadku wykorzystania jednakowych elementów, cykl przetwarzania przetwornika dwustopniowego trwa dwa razy dłużej niż jednostopniowego. W celu uzyskiwania poprawnych wyników, należy zapewnić stałą wartość przetwarzanego sygnału podczas obu faz pracy przetwornika. Dlatego niezbędne jest poprzedzenie przetwornika dwustopniowego układem próbkująco-pamiętającym (S/H), znajdującym się w stanie pamiętania podczas całego cyklu przetwarzania.

Budowa przetwornika dwustopniowego wymaga znacznie mniejszej liczby komparatorów i elementów dekodujących niż jednostopniowego układu z bezpośrednią komparacją. Realizacja układu z rys. 3 wymaga zaledwie 30 komparatorów, co stanowi istotną zaletę w porównaniu z liczbą 255 komparatorów, niezbędnych do wykonania bezpośredniej komparacji 8 bitów w układzie z rys. 2. Z tego powodu szybkie przetworniki o rozdzielczości 8...14 bitów są z reguły budowane jako dwu, a nawet trzystopniowe.

Przykład realizacji 12-bitowego, trzystopniowego przetwornika przystosowanego do przetwarzania 20 Mp/s (milionów próbek na sekundę) przedstawiono na rys. 4. Układ zawiera trzy przetworniki analogowo-cyfrowe z równoczesną komparacją (A/C) oraz dwa przetworniki cyfrowo-analogowe (C/A). Wartości cyfrowe uzyskiwane z poszczególnych stopni przetwornika są sumowane w ukła-

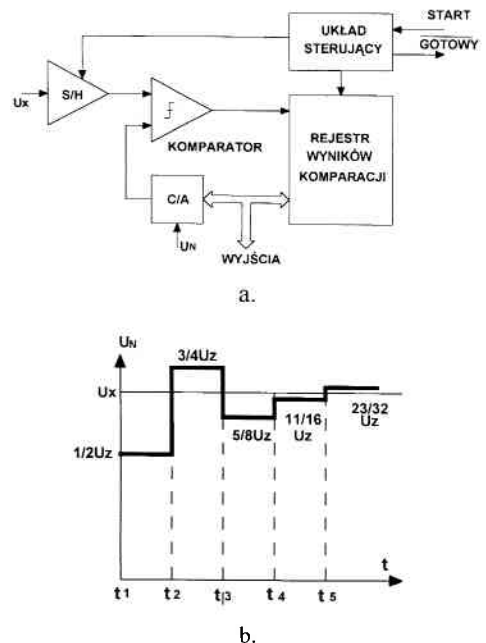


Rys. 4. Trzystopniowy, równoległy, 12-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy (Analog Devices AD9022).

dzie cyfrowym, przy czym ostateczny wynik przetwarzania obejmuje 12 bitów, a dwa nadmiarowe bity są wykorzystywane do cyfrowej korekcji niedokładności największych przyrostów napięcia odniesienia uzyskiwanych z zastosowanych przetworników cyfrowo-analogowych.

## Przetworniki z wagową komparacją

W przetwornikach analogowo-cyfrowych o średniej szybkości działania (rzędu  $10^3$ ... $10^7$  próbek na sekundę) najczęściej jest stosowana bardzo efektywna zasada wagowej komparacji sygnału wejściowego z kolejno malejącymi przyrostami napięcia odniesienia (rys. 5). W przetwornikach działających w oparciu o tę zasadę sygnał wejściowy jest porównywany z krokowo narastającym napięciem wzorcowym, generowanym przez pomocniczy przetwornik cyfrowo-analogowy (C/A). Podczas pierwszego kroku ( $t_1$ ), napięcie wzorcowe odpowiada połowie całego zakresu przetwarzania przetwornika. W zależności od wyniku komparacji po wykonaniu



Rys. 5. Przetwornik A/C z wagową komparacją:

- a – schemat blokowy  
b – zasada komparacji

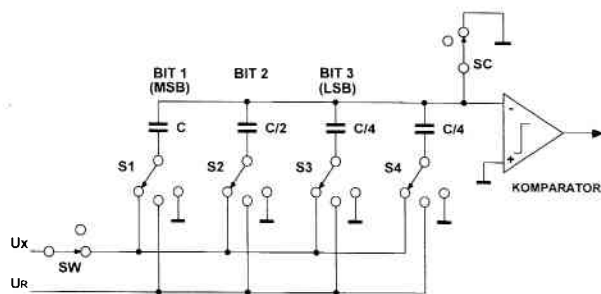
tego kroku, najbardziej znaczący bit wyniku i odpowiadający mu przyrost napięcia odniesienia jest pozostawiany w stanie włączonym lub zerowany. W drugim kroku przetwornik cyfrowo-analogowy włącza kolejny przyrost napięcia odniesienia, w tym przypadku odpowiadający 1/4 całego zakresu przetwarzania (czas  $t_2$  na rys. 5b). W następnym kroku ( $t_3$ ), w zależności od wyniku kolejnej komparacji, ostatnio włączony przyrost napięcia odniesienia pozostaje w stanie włączonym lub jest zerowany, a procedura jest powtarzana aż do wyczerpania wszystkich bitów przetwornika C/A.

Pełny cykl przetwarzania n bitowego przetwornika składa się z n cykli zegarowych i po jego zakończeniu stan przetwornika cyfrowo-analogowego powinien z dokładnością do najmniej znaczącego bitu odwzorowywać wartość sygnału wejściowego.

Uzyskanie n bitowego wyniku przetwarzania wymaga n cykli komparacji. Podobnie jak w przypadku wielostopniowego przetwornika z równoczesną komparacją, komparator przetwornika z wagową komparacją powinien być poprzedzony układem próbkująco-pamiętającym (S/H), w związku z czym pełny cykl przetwarzania tego przetwornika należy uzupełnić poprzedzającym go okresem pobierania próbki mierzonego sygnału.

Przetworniki analogowo-cyfrowe obecnie są z reguły wykonywane technologią krzemowych układów scalonych. Powoduje to tendencje do zastępowania dotychczasowych drabinek rezystorowych, niezbędnych do realizacji przetworników C/A, zespołami kondensatorów o niewielkich pojemnościach, które również mogą być wykorzystywane do generacji regulowanych skokowo napięć odniesienia. Zasadę działania takiego dzielnika, stosowanego we współczesnych przetwornikach z wagową komparacją, przedstawiono na przykładzie prostego, trzybitowego układu na rys. 6.

Początek cyklu przetwarzania jest wyznaczany momentem otwarcia przełączników SW i SC. Jeżeli S1, S2, S3 i S4 są dołączone do potencjału zerowego, na wejście A komparatora oddziałuje potencjał  $-U_x$ . Przełączenie przełącznika S1 do napięcia referencyjnego  $U_n$  powoduje zmianę potencjału  $-U_x$  o połowę wartości  $U_n$ .



Rys. 6. Zasada działania przetwornika C/A z dzielnikiem pojemnościowym.

Stan wyjścia komparatora w tym momencie może być wykorzystany do podjęcia decyzji o pozostawieniu lub wyłączeniu najbardziej znaczącego bitu (t.j. o pozostawieniu przełącznika S1 dołączonego do  $U_n$  lub przełączeniu go do potencjału zerowego). W następnych cyklach podobna procedura jest kontynuowana w odniesieniu do przełączników S2 i S3, zmieniających potencjał wejścia A kolejno o 1/4 i 1/8 wartości  $U_n$ . Po zakończeniu, przełączniki S1, S2, S3, S4 i SW są dołączane do wejścia  $U_x$ , przełącznik SC do potencjału zerowego i konwerter jest gotowy do wykonania następnego cyklu przetwarzania.

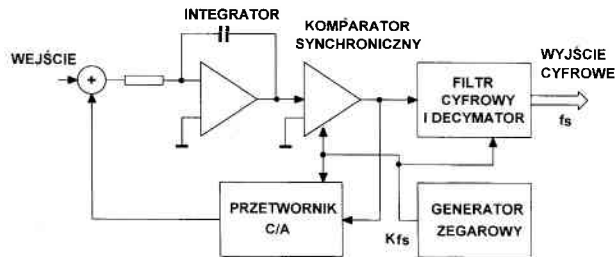
W wytwarzanych przemysłowo przetwornikach analogowo-cyfrowych liczba stopni dzielnika pojemnościowego zawiera się od 8 do 18, a przełączniki są realizowane za pomocą półprzewodnikowych kluczy wykonywanych technologią CMOS [3]. W przetwornikach tego typu często wykorzystywane są bity nadmiarowe, wykorzystywane do cyfrowej korekcji pojemności kondensatorów, realizowanych w krzemie wspólnie z pozostałymi elementami układu.

## Przetworniki nadpróbkujące

W ostatnich latach szerokie zastosowanie w systemach pomiarowych zdobyły przetworniki z modulatorami sigma-delta wykorzystujące nadpróbkowanie przetwarzanego sygnału [4]. Wykorzystanie nadpróbkowania zapewnia możliwość osiągania wysokiej rozdzielczości bez konieczności stosowania precyzyjnych lub wymagających doboru elementów. Wysoką rozdzielczość przetwarzania uzyskuje się dzięki cyfrowej obróbce sygnałów, dokony-

wanej w filtrach cyfrowych wchodzących w skład tych przetworników, realizowanych za pomocą dobrze opanowanych procesów technologicznych, stosowanych do produkcji standardowych cyfrowych układów scalonych.

Strukturę prostego przetwornika nadpróbkującego z pojedynczym układem całkującym (*ang. first order oversampling converter*) przedstawiono na rys. 7. Modulator sigma-delta, złożony z integratora, komparatora i prostego, zazwyczaj jednobitowego, prze-



Rys. 7. Nadpróbkujący przetwornik analogowo-cyfrowy z modulacją sigma-delta.

twornika cyfrowo-analogowego, zamienia sygnał wejściowy przetwornika na ciąg impulsów zero-jedynkowych o częstotliwości zgodnej z częstotliwością generatora zegarowego. Sygnały wyjściowe przetwornika C/A są odejmowane od sygnału wejściowego, a działanie pętli sprzężenia zwrotnego o odpowiednio dużym wzmocnieniu sprawia, że w dłuższym okresie czasu wartość średnia ciągu sygnałów wyjściowych komparatora odpowiada wartości średniej sygnału wejściowego.

Filtr cyfrowy, stanowiący istotną część przetwornika, pełni również funkcję decymatora, zamieniając szeregowy strumień sygnałów binarnych na równoległe słowa, generowane z odpowiednio mniejszą częstotliwością, stanowiącą podwielokrotność częstotliwości zegara próbkującego komparator. Stosunek częstotliwości próbkowania komparatora do podwojonej szerokości pasma przenoszenia filtra-decymatora, nazywany współczynnikiem nadpróbkowania (*ang. oversampling ratio*), jest jednym z najważniejszych parametrów, określających właściwości metrologiczne przetworników nadpróbkujących.

Rozpatrując właściwości układu, przedstawionego na rys. 7, należy stwierdzić, że transmitancja integratora jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości. Tak więc, sygnał wyjściowy sigma-delta modulatora wynosi:

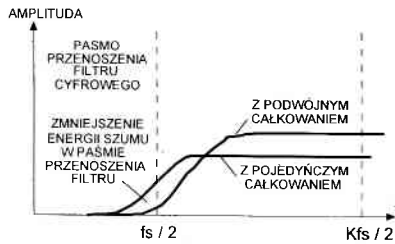
$$y = \frac{u - y}{f} + e,$$

gdzie  $u$  jest sygnałem wejściowym, a  $e$  – szumem kwantyzacji. Powyższą zależność można przedstawić w bardziej czytelnej postaci:

$$y = \frac{u}{f + 1} + \frac{f}{f + 1} \cdot e,$$

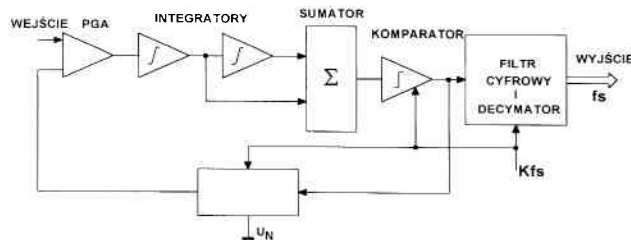
z której wynika, że w stosunku do sygnału wejściowego modulator sigma-delta zachowuje się jak filtr dolnoprzepustowy, natomiast w odniesieniu do szumu kwantyzacji wywiera efekt filtra górnoprzepustowego. Jest to spowodowane obecnością integratora w układzie modulatora i powoduje bardzo korzystny efekt kształtowania charakterystyki częstotliwościowej widma szumu kwantyzacji, związany z przesunięciem jego energii w kierunku większych częstotliwości, leżących częściowo poza pasmem przenoszenia dolnoprzepustowego filtra cyfrowego przetwornika (rys. 8). Efekt ten, poprawiający stosunek sygnału do szumu, można z wielokrotnie, stosując modulatory sigma-delta zawierające dwa lub więcej połączonych kaskadowo integratorów (rys. 9).

Szczegółowa analiza pozwala stwierdzić, że stosunek sygnału do szumu kwantowania przetwornika z sigma-delta modulacją rośnie wraz ze współczynnikiem nadpróbkowania, przy czym wzrost



Rys. 8. Widmo szumów kwantowania w przetwornikach z modulacją sigma-delta.

ten zawiera się od 9dB/oktawę dla modulatorów z pojedynczym całkowaniem, do 15dB/oktawę z podwójnym (*ang. second-order sigma-delta modulator*) i 21dB/oktawę dla modulatorów z potrójnym całkowaniem [5]. Dodatkowo zmniejszenie mocy szumu w wykorzystywanym paśmie częstotliwościowym powoduje również sam efekt nadpróbkowania. Wywołany tym efektem przyrost sto-



Rys. 9. Nadpróbkujący przetwornik analogowo-cyfrowy z podwójną integracją.

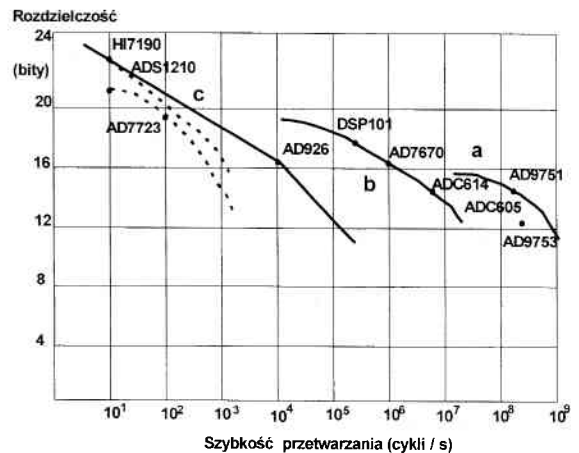
sunku sygnału do szumu jest stosunkowo niewielki (proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego ze współczynnika nadpróbkowania, a więc zaledwie 3dB/oktawę), umożliwiając poprawienie efektywnej rozdzielczości tylko o 0,5 bita przy dwukrotnym powiększeniu współczynnika nadpróbkowania. Jest to powodem stosowania modulatorów sigma-delta z wielokrotną integracją (*ang. high order sigma-delta integrator*).

Błędy przetwarzania przetworników nadpróbkujących mają charakter przypadkowy i z reguły są określane nie za pomocą wartości maksymalnych, lecz skutecznych. W tych przetwornikach nominalna rozdzielczość wyniku, wynikająca z długości słowa sygnałów wyjściowych, zdeterminowanych budową filtra i decymatora cyfrowego, jest z reguły większa od rozdzielczości skutecznej (*ang. effective resolution*), określonej dyspersją wyników powodowanej głównie (choć nie tylko) szumem układów wejściowych i szumem kwantyzacji. Uwzględniając normalny rozkład prawdopodobieństwa szumu, wartość maksymalną błędu przetwornika zazwyczaj przyjmuje się na poziomie 6,6 krotności jego wartości skutecznej, co zapewnia, że prawdopodobieństwo przekroczenia tak określonego błędu jest mniejsze od 0,5%.

Od kilku lat produkowane są przemysłowo przetworniki sigma-delta, specjalnie przystosowane do zastosowań pomiarowych, a w szczególności do przetwarzania sygnałów wolno-zmiennych, pochodzących z sond temperaturowych oraz z tensometrycznych czujników siły, ciśnienia i innych wielkości fizycznych. Bardzo dobre właściwości metrologiczne, łatwość łączenia z czujnikami i z mikroprocesorami, oraz umiarkowane ceny tych elementów sprawiają, że znajdują one coraz szersze zastosowanie w urządzeniach pomiarowych, zastępując inne, do tej pory używane typy przetworników analogowo-cyfrowych

## Obszary zastosowań przetworników analogowo-cyfrowych

Zakres zastosowań poszczególnych rodzajów przetworników analogowo-cyfrowych określają dwa główne wymagania, stawiane sys-



Rys. 10. Zakresy zastosowań przetworników analogowo-cyfrowych:  
a - przetworniki z równoczesną komparacją,  
b - przetworniki z szeregową komparacją,  
c - przetworniki nadpróbkujące

temowi pomiarowemu: rozdzielczość i szybkość przetwarzania. Zależność skutecznej rozdzielczości od szybkości przetwarzania dla trzech poprzednio omówionych rodzajów przetworników przedstawiono graficznie na rys. 10.

Na rysunku tym linią ciągłą zaznaczono granice najwyższych osiągniętych skutecznych rozdzielczości w funkcji szybkości przetwarzania aktualnie produkowanych przemysłowo przetworników. Na wykresie zaznaczono również w postaci punktów i linii przerywanych wartości odpowiadające niektórym, najbardziej charakterystycznym typom produkowanych przetworników.

Należy zaznaczyć, że iloczyn skutecznej rozdzielczości i szybkości przetwarzania produkowanych przetworników szybko rośnie w miarę rozwoju technologii półprzewodnikowych układów scalonych. Laboratoryjnie są już wykonywane 8-bitowe przetworniki o szybkości przetwarzania do 30 Giga próbek/s [6]. Drugą wyraźną tendencją, związaną z udoskonalaniem konstrukcji i technologii wszystkich elementów półprzewodnikowych, a w tej liczbie również przetworników analogowo-cyfrowych, jest malejące zapotrzebowanie na energię zasilającą. Niemal wszystkie współczesne przetworniki, wykonywane technologią komplementarnych tranzystorów CMOS, charakteryzują się bardzo małym zapotrzebowaniem mocy, przy czym ten pobór jest z reguły proporcjonalny do aktualnie realizowanej szybkości przetwarzania.

## Przetworniki A/C w systemach pomiarowych

We współczesnych systemach pomiarowych przetworniki analogowo-cyfrowe mogą występować w postaci specjalizowanych pakietów, przystosowanych do umieszczania w komputerach osobistych, albo oddzielnych bloków, jakimi są uniwersalne woltomierze lub multimetry cyfrowe. Stosowanie komputerowych pakietów oraz specjalnego oprogramowania wspomagającego tworzenie tzw. przyrządów wirtualnych, jest najmniej kosztownym sposobem realizacji cyfrowych systemów pomiarowych w tych przypadkach, w których nie występują wysokie wymagania metrologiczne. Przeszkodą w zastosowaniu takiej metody do realizacji bardziej dokładnych systemów pomiarowych jest mała rozdzielczość przetwarzania oferowanych pakietów przetwornikowych, oraz znaczne wpływy zakłóceń elektromagnetycznych, występujących wewnątrz komputerów. Należy zaznaczyć, że współczesne komputery podczas pracy wytwarzają szerokie spektrum zakłóceń elektromagnetycznych, zarówno przewodzonych jak i wypromieniowanych, które nie pozostają bez wpływu na procesy przetwarzania stosunkowo słabych sygnałów analogowych, doprowadzanych do pakietu przetwornikowego, umieszczonego wewnątrz komputera. Dlatego naj-

pewniejszą metodą realizacji przetwarzania analogowo-cyfrowego jest stosowanie wytwarzanych przemysłowo uniwersalnych multimetrów cyfrowych, zapewniających odpowiednie kondycjonowanie mierzonych sygnałów i galwaniczne rozdzielanie obwodów pomiarowych od układów wyjściowych, które mogą być swobodnie łączone z cyfrową częścią systemu pomiarowego [7].

## Literatura

- [1] Jackiewicz B.: Przetwarzanie analogowo-cyfrowe w nowoczesnych systemach pomiarowych. Znaczenie i aspekty aplikacyjne. *VI Sympozjum Klubu Polskie Forum ISO-9000 „Metrologia w Systemach Jakości”*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2000, t.II s.113-126
- [2] Plassche R. (tłum. Kulka Z. i Nadachowski M): *Scalone przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe*. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1997
- [3] Kesler W., Bryant J.: *Analog Devices Applications Guide*. Analog Devices, USA, 1999, s. 13.1-13-47
- [4] Jackiewicz B.: Rozdzielczość i liniowość pomiarowych przetworników analogowo-cyfrowych z nadpróbkowaniem. *Metrologia i Systemy Pomiarowe* nr 1-2, 1997
- [5] Jackiewicz B.: Nadpróbkujące przetworniki analogowo-cyfrowe w przyrządach i systemach pomiarowych. *Prace Przemysłowego Instytutu Elektroniki* nr 127, 1996 s. 5-70
- [6] Fraundi J., Harrold S.J.: Performance improvements in multi-gigabit/s oversampling ADCs. *Proceedings of the III International Conference on Advanced A/D and D/A onversion Techniques and their Applications*. IEE, Glasgow, U.K. 1999, s.1-4
- [7] Jackiewicz B., Pierzgałski W., Reska D.: Uniwersalny multimetr cyfrowy z nadpróbkującym przetwornikiem analogowo-cyfrowym. Metody kalibracji i automatycznej korekcji wskazań. *Materiały III Konferencji „Systemy pomiarowe w badaniach naukowych i w przemyśle”* Wydawnictwo Politechniki Zielonogórskiej, Zielona Góra 2000 s. 93-102