

Jerzy JAKUBIEC

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI

Proces pomiaru w przetworniku A/C typu Sigma-Delta

Prof. dr hab. inż. Jerzy JAKUBIEC

Zastępca dyrektora ds. naukowych Instytutu Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej. Studia ukończył na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w 1971 r., w 1978 uzyskał stopień doktora, w 1989 – doktora habilitowanego, w 2004 – tytuł profesora. Zainteresowania naukowe: analiza propagacji błędów w systemach pomiarowo-sterujących, synteza modeli niepewności algorytmów przetwarzania danych pomiarowych, modelowanie metrologicznych właściwości torów przetwarzania analogowo-cyfrowego.



e-mail: jerzy.jakubiec@polsl.pl

Streszczenie

Działania realizowane przez przetwornik A/C typu Sigma-Delta opisano w artykule jako proces pomiaru podzielony na trzy etapy: przetwarzanie analogowe, kwantowanie i przetwarzanie cyfrowe. Poddano analizie podstawowe źródła błędów, a następnie określono wpływ decymacji i filtracji na właściwości wypadkowego błędów wyniku pomiaru. Rozważania analityczne zilustrowano wynikami symulacji uzyskanymi przy użyciu metody Monte Carlo.

Słowa kluczowe: przetwornik Sigma-Delta, kwantowanie, błąd pomiaru.

Measurement process in Sigma-Delta AD converter

Abstract

A basic scheme of a Sigma-Delta AD converter, analyzed in the paper, is shown in Fig. 1. The converter performs a quantization process, which can be described as compensation of the charge, delivered to the integrator from the source of the measured voltage U_x , with quanta of charge obtained synchronously with clock CLK when the switch P is closed. Value of a charge quantum is given by Eq. (1) and the balance state of the quantizer by Eq. (2). Basing on this equation one can obtain expression (3) describing a measurement result and Eq. (4) that describes value of a voltage quantum. All stages of the processing made by Sigma-Delta converter, i.e. analog conversion, quantization and digital processing, are shown in Fig. 3. One can distinguish three main error sources in this process – input error described by Eq. (6) and two errors connected with quantization: quantization error and standard error caused by dispersion of the quanta values (Eqs. (8), (9) and Fig. 3). Next considerations deal with analysis of decimation and averaging influence on the quantization error and the standard error. Fig. 4 shows exemplary histogram of the quantization error after averaging and Fig. 5 the error being the result of composition of both mentioned errors. Having the errors described one can calculate uncertainty of a measurement result using the procedure presented in paper [3].

Keywords: Sigma-Delta converter, quantization, measurement error.

1. Wstęp

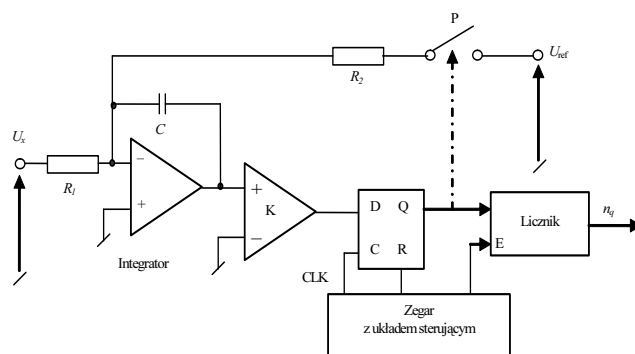
Analogowo/cyfrowe przetworniki Sigma-Delta są współcześnie powszechnie stosowane w technice pomiarowej lecz bardzo rzadko spotyka się w literaturze rozważania dotyczące analizy procesu pomiaru realizowanego przez tego rodzaju przetworniki. Metrologiczne właściwości przetworników Sigma-Delta rozpatrywane są głównie pod kątem przetwarzania sygnałów o określonych parametrach, przy czym na ogół są to sygnały akustyczne [1]. Takie podejście jest oczywiście bardzo użyteczne w specyficznych warunkach przetwarzania, jednak nie daje odpowiedzi na pytanie, jakie właściwości ma przetwornik Sigma-Delta jako uniwersalne narzędzie pomiarowe (przyrząd pomiarowy). Poszukiwanie takiej odpowiedzi musi być poprzedzone jednoznacznym określeniem wymagań stawianych przyrządowi pomiarowemu. Można powiedzieć, że od pewnego czasu w środowisku metrologów utrwalił się rodzaj konsensusu w tej kwestii – w duchu przewodnika [2].

W najbardziej elementarnym ujęciu można przyjąć, że przetwornik pomiarowy jest źródłem wyniku pomiaru będącego liczbą zbliżoną do rzeczywistej wartości wielkości mierzonej w stopniu najlepszym z możliwych do uzyskania w przyjętych warunkach pomiarowych. Oczywiście w praktyce niezbędne jest wskazanie procedury pozwalającej na liczbowe określenie jak dobrze przetwornik realizuje tak postawione zadanie. Powszechnie przyjmuje się, że właściwości wyniku pomiaru rozpatrywane są w kategoriach probabilistycznych, a parametr opisujący w ten sposób jakość wyniku nazywany jest niepewnością. Niepewność interpretowana jest jako połowa szerokości przedziału tworzonego wokół wyniku pomiaru w taki sposób, aby prawdopodobieństwo wystąpienia w tym przedziale prawdziwej wartości wielkości mierzonej było odpowiednio duże (typowo 0,95).

W pracy [3] opisano koncepcję obliczania niepewności bazującą na losowym modelu wyniku pomiaru, będącym sumą wskazań i błędów, z których każdy reprezentuje wyodrębnioną, losową przyczynę powstawania rozbieżności między wskazaniem przyrządu a wartością prawdziwą. Tego rodzaju model pozwala na odrębną analizę poszczególnych źródeł błędów, wyznaczenie niepewności cząstkowej związanej z tym źródłem, a następnie na obliczenie niepewności wyniku przez złożenie niepewności cząstkowych. Ze względu na prostotę tego rodzaju modelu i możliwość szerokiego stosowania metody Monte Carlo zarówno do badania źródeł, jak i wyznaczania rozkładów błędów wypadkowych, koncepcję tę zastosowano również w niniejszej pracy.

2. Podstawowy układ przetwornika Sigma-Delta

Istnieje wiele rozwiązań układowych przetworników Sigma-Delta, wiele z nich cechuje się dużą złożonością konstrukcji [1]. Założeniem pracy jest przeprowadzenie analizy podstawowych właściwości tego rodzaju przetworników i w tym celu wybrano rozwiązanie pokazane opisane w pracy [4] i pokazane na rys. 1. Charakteryzuje się ono prostotą budowy, dzięki czemu można stosunkowo prosto interpretować przyczyny powstawania błędów i wyznaczać ich opis przy użyciu badań symulacyjnych.



Rys. 1. Podstawowy schemat przetwornika Sigma-Delta
Fig. 1. The basic scheme of the Sigma-Delta converter

Przetwornik Sigma-Delta realizuje pomiar na zasadzie kwantowania [5], co oznacza, że wielkość mierzona jest porównywana w nim z wzorcem o strukturze kwantowej, czyli składającym się z elementarnych wzorców o nominalnie jednakowej wartości, nazywanych kwantami. Kwantowanie odbywa się w integratorze i polega na kompensacji ładunku pobieranego ze źródła napięcia mierzonego U_x przez kwanty ładunku dostarczane ze źródła napięcia wzorcowego U_{ref} synchronicznie z impulsami zegarowymi CLK. Kwant ładunku jest przekazywany do integratora w stanie

złączenia przełącznika P, który jest sterowany przez przerzutnik typu D ustawiany w stan 1 przednim zboczem impulsu zegarowego w przypadku, gdy napięcie na wyjściu integratora jest większe od zera (określa to komparator K) oraz zerowany każdym tylnym zboczem tego impulsu. Kwanty dostarczane do integratora zliczane są przez licznik w czasie $T = k_z T_w$, gdzie k_z jest pojemnością licznika, T_w okresem impulsów zegarowych CLK, a T jest czasem realizacji kwantowania. Po jego zakończeniu stan licznika wynosi n_q i wskazuje liczbę zliczonych kwantów ładunku.

Zgodnie z rys. 1 i przedstawionym opisem, kwant ładunku powstaje na skutek ładowania kondensatora C stałym prądem ze źródła napięcia odniesienia U_{ref} w czasie $T_w/2$, ma zatem wartość:

$$q = \frac{U_{ref}}{R_2} \frac{T_w}{2}. \quad (1)$$

Suma kwantów w liczbie n_q kompensuje ładunek proporcjonalny do mierzonego napięcia U_x dopływający z obwodu wejściowego przez cały czas kwantowania T . Po zakończeniu kwantowania w kondensatorze pozostaje pewien ładunek o wartości mieszczącej się w granicach od $-q$ do q zależnie od wartości mierzonego napięcia. Ten stan równowagi ładunku z dokładnością do 1 kwantu można zapisać jako:

$$\frac{U_x}{R_1} k_z T_w \cong \frac{U_{ref}}{R_2} \frac{T_w}{2} n_q. \quad (2)$$

Zależność (2) pozwala na wyznaczenie związku wskazania mianowanego kwantyzatora, wyrażonego w jednostkach napięcia mierzonego, z liczbą zliczonych impulsów n_q . Zakładając równość obu stron wyrażenia (2) otrzymuje się:

$$\hat{U}_x = \frac{R_1}{R_2} \frac{U_{ref}}{2k_z} n_q. \quad (3)$$

Wskazanie \hat{U}_x jest wynikiem pomiaru z rozdzielczością właściwą dla pomiaru napięcia przez przetwornik Sigma-Delta. Zgodnie z zależnością (3), dla $n_q = 1$, zachodzi:

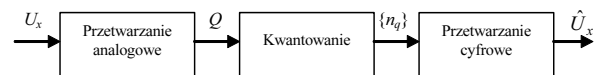
$$LSB = q_U = \frac{R_1}{R_2} \frac{U_{ref}}{2k_z}, \quad (4)$$

gdzie LSB jest wartością najmniej znaczącego bitu przetwornika równą „pozornemu” kwantowi q_U , który można określić jako najmniejszą rozróżnialną wartość napięcia mierzonego. Interpretacja fizyczna tego rodzaju kwantu jest trudna ze względu na to, że w przetworniku Sigma-Delta występuje wstępne przetwarzanie napięcia na ładunek, który w drugiej fazie jest poddawany właściwemu kwantowaniu. Zależność (4) jest jednak bardzo użyteczna, gdyż pokazuje jakie czynniki, i w jaki sposób, wpływają na wartość „pozornego” kwantu napięcia. Wynika z niej, między innymi, że wartość tego kwantu może być kształtowana przez dobór czasu kwantowania (pojemności licznika k_z). Wydłużanie tego czasu powoduje zmniejszanie wartości kwantu napięcia, a tym samym zmniejszenie błędu pomiaru. Jest to istotna właściwość przetworników Sigma-Delta, dzięki której osiągają one dużą dokładność.

3. Proces przetwarzania

Zgodnie z podanym opisem i schematem z rys. 1, przetwornik Sigma-Delta realizuje kolejno dwa etapy przetwarzania – najpierw napięcie mierzone zamieniane jest na ładunek elektryczny, który następnie poddawany jest kwantowaniu. Należy także zaznaczyć, że w tego rodzaju przetwornikach jest realizowany także trzeci rodzaj przetwarzania: jest to przetwarzanie cyfrowe, które ze

względu na prostotę opisu nie było dotychczas uwzględniane. Pełny schemat procesu przetwarzania pokazuje rys. 2.



Rys. 2. Schemat przetwarzania realizowanego przez przetwornik Sigma-Delta
Fig. 2. Scheme of processing realized by a Sigma-Delta converter

Przetwarzanie odbywa się w kolejności zgodnej ze schematem z rys. 2, jednak wszystkie fazy realizowane są współbieżnie, czyli w tym samym czasie określanym jako czas pomiaru T_s . Czas ten jest zarazem czasem próbkowania napięcia mierzonego U_x , które w pierwszej fazie przetwarzania analogowego zamieniane jest na ładunek zgodnie z zależnością:

$$Q = \int_0^{T_s} \frac{U_x}{R_1} dt \quad (5)$$

uzyskaną na podstawie schematu z rys. 1.

Kwantowanie ładunku Q odbywa się w miarę jego dostarczania i jest synchronizowane impulsami z generatora wzorcowego (zegara). Wynik n_q pojedynczego kwantowania uzyskiwany jest po czasie T będącym iloczynem pojemności licznika i okresu zegara. W jednym okresie próbkowania kwantowanie powtarzane jest wielokrotnie, przy czym liczba powtórzeń zależy od współczynnika decymacji, określającego ile wyników kwantowania jest odrzucanych, oraz liczby danych wejściowych filtru zastosowanego do przetwarzania cyfrowego. Przyjmijmy ogólnie, że dla celów przetwarzania cyfrowego wymagany jest ciąg wyników kwantowania $\{n_q(m)\}$, gdzie m jest liczbą realizacji kwantowania. Oznacza to zarazem, że czas próbkowania wynosi w takim przypadku $T_s = mT$.

Na rys. 2 na wyjście przetwornika Sigma-Delta przekazywany jest wynik \hat{U}_x pomiaru wartości napięcia U_x , a zatem przetwarzanie programowe realizuje także odtwarzanie wartości mierzonego napięcia. Działanie takie występuje tylko w niektórych rozwiązaniach przetworników. Zastosowano je w pracy, gdyż umożliwiła bardziej czytelną prezentację wyników badań.

Decymacja i filtracja są działaniami pozwalającymi na kształtowanie dokładnościowych właściwości przetwornika Sigma-Delta. Aby ocenić ich skuteczność niezbędne jest wyodrębnienie źródeł błędów procesu przetwarzania oraz analiza wpływu przetwarzania cyfrowego na błąd wypadkowy końcowego wyniku przetwarzania.

4. Błędy przetwornika Sigma-Delta

Można wyróżnić trzy podstawowe źródła błędów w przetworniku Sigma-Delta: pierwsze związane jest z przetwarzaniem analogowym a dwa pozostałe z procesem kwantowania. Przetwarzanie analogowe realizowane jest zgodnie z wyrażeniem (5), a zatem błąd wprowadzany na wejście kwantyzatora, spowodowany addytywnymi zakłóceniami napięcia mierzonego, można zapisać jako:

$$\delta_U = \int_0^{T_s} \frac{\varepsilon(t)}{R_1} dt, \quad (6)$$

gdzie $\varepsilon(t)$ jest wypadkową zniekształceń napięcia wejściowego, zakłóceń elektromagnetycznych oraz szumów w obwodzie wejściowym integratora. Błąd ten można określić jako pozostałość po uśrednieniu w czasie T_s napięcia zakłócającego $\varepsilon(t)$. Dla zakłóceń periodycznych wartość błędów wejściowego zależy od czasu uśredniania, a zatem dobierając odpowiednio współczynnik decymacji

można zminimalizować tę wartość dla znanych zakłóceń napięcia mierzonego. Do dalszych rozważań przyjmuje się, że błąd wejściowy ma właściwości losowe, a jego rozkład jest znany.

Drugi rodzaj błędu związany jest z samą istotą procesu pomiaru na zasadzie kwantowania. Mianowicie, wartości wielkości mierzonej przyporządkowywana jest ograniczona liczba kwantów co powoduje, że występuje różnica między tą wartością a wartością sumy kwantów, nazywana błędem kwantowania. Jeżeli kwantowanie przeprowadza się wielokrotnie dla stałej wartości napięcia mierzonego i przy założeniu, że integrator jest wyzerowany tylko raz na początku okresu próbkowania, to błąd kwantowania przetwornika Sigma-Delta przybiera tylko dwie wartości zależne od wartości napięcia mierzonego [6].

Ze wzoru (4) wynika, że zwiększając pojemność licznika można zmniejszać wartość kwantu, a tym samym zwiększać dokładność przetwornika, co wyraża się odpowiednio rosnącą liczbą bitów wskazania. Postępowanie takie ogranicza ujawnianie się innych błędów, które zaczynają dominować przy zbyt dużym zmniejszeniu błędu kwantowania. W szczególności należy wziąć pod uwagę drugi z błędów procesu kwantowania – związany ze zjawiskiem, które można określić jako drżenie kwantów.

Nominalnie wszystkie kwanty użyte w procesie kwantowania mają jednakowe wartości, jednak w praktyce są one różne. Przyczyny tego zjawiska są różnorodne i zależą od rodzaju kwantyzatora. W przypadku przetwornika Sigma-Delta pokazanego na rys. 1, przyczyny rozrzutu wartości poszczególnych kwantów tkwią przede wszystkim w krótkookresowych zmianach częstotliwości zegara oraz fluktuacjach czasów zamykania i otwierania przełącznika P. Łącznie te zjawiska powodują losowe zmiany momentów początku i końca ładowania kondensatora C, co skutkuje odpowiednimi zmianami wartości kolejnych kwantów i nazywane jest drżeniem kwantów.

W celu poddania analizie wpływu zjawiska drżenia kwantów na błąd procesu kwantowania dogodnie jest rozpatrywać go jako porównywanie wielkości mierzonej z wzorcem wielowartościowym. Wzorec taki powstaje przez dodawanie do siebie kolejnych kwantów i nazywany jest wzorcem o strukturze kwantowej, w skrócie – wzorcem kwantowym. Poszczególne realizacje wzorca, będące sumami kwantów, nazywane są wzorcami cząstkowymi.

Rzeczywiste wartości kwantów różnią się ich wartości nominalnej. W rozpatrywanej sytuacji wartość kwantu można opisać za pomocą wyrażenia:

$$q = q_{\text{nom}} + \delta_{r1} + \delta_{r2}, \quad (7)$$

gdzie q_{nom} jest nominalną wartością kwantu, a δ_{r1} i δ_{r2} są błędami losowymi o znanym rozkładzie opisującymi odpowiednio wpływ na zmiany kwantu pierwszego i drugiego zbocza impulsu zamykającego przełącznik P. Załóżmy dla prostoty rozkład jednostajny obu błędów w zakresie $[-r, r]$, gdzie r określa granice zmian wartości kwantu.

Odchyłki kwantów kumulują się w kolejnych wzorcach cząstkowych, co powoduje powstawanie dodatkowego błędu wyniku kwantowania, nazywanego błędem wzorca. Dla wskazania kwantyzatora równego n_q wartość wzorca cząstkowego wynosi:

$$x_{\text{wz}}(n_q) = \sum_{n=1}^{n_q} q(n) = n_q q_{\text{nom}} + \sum_{n=1}^{n_q} \delta_{r1}(n) + \sum_{n=1}^{n_q} \delta_{r2}(n), \quad (8)$$

gdzie x oznacza ładunek lub napięcie w zależności od tego, jaki rodzaj kwantu jest rozpatrywany. A zatem błąd wzorca ma w takim przypadku postać:

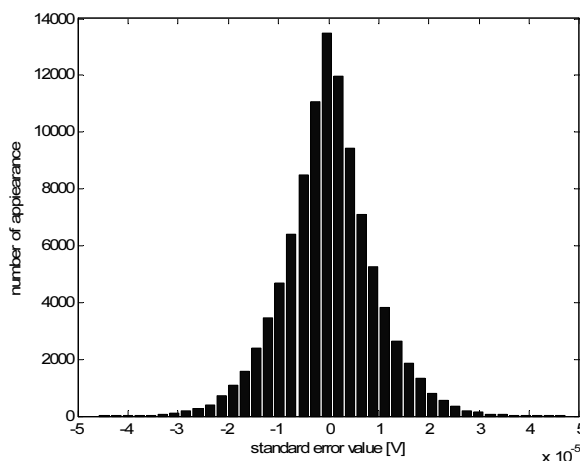
$$\delta_{\text{wz}}(n_q) = \sum_{n=1}^{n_q} \delta_{r1}(n) + \sum_{n=1}^{n_q} \delta_{r2}(n). \quad (9)$$

Gdy weźmie się pod uwagę, że rozkłady błędów we wzorze (9) są, zgodnie z przyjętym założeniem, takie same, to zgodnie z centralnym twierdzeniem granicznym rozkład ich sumy (w praktyce od $n = 2$) można uznać jako normalny. Gdy błędy te są niezależne, wariancję błędu wzorca opisuje wyrażenie:

$$\sigma_{\text{wz}}^2(n_q) = n_q(\sigma_{r1}^2 + \sigma_{r2}^2) = 2n_q\sigma_r^2, \quad (10)$$

gdzie $2\sigma_r^2$ jest wariancją rozrzutu wartości kwantu i dla rozkładu jednostajnego $\sigma_r^2 = r^2/3$. Ze wzoru (10) wynika, że wariancja błędu wzorca jest zależna od wskazania n_q .

W przypadku, gdy charakteryzuje się ogólnie właściwości przetwornika trzeba to zrobić w sposób obejmujący łącznie błędy wszystkich, możliwych do utworzenia, wzorców cząstkowych. Uzyskanie tego rodzaju opisu w sposób analityczny jest zagadnieniem trudnym, staje się natomiast stosunkowo proste jeśli użyje się metody Monte Carlo. Rys. 3 przedstawia przykładowy histogram błędu wzorca 12-bitowego przetwornika Sigma-Delta z rys. 1 uzyskany dla 100 000 wyników pomiaru. Zakres przetwornika wynosi od 0 do 1 V przy założeniu, że $R_1 = R_2$, $U_{\text{ref}} = 2$ V. Rozrzut momentów początku i końca kwantu równy jest 0,1% nominalnej wartości czasu trwania kwantu T_w . Odchylenie standardowe błędu, o rozkładzie jak na rys. 3, ma wartość $2,25 \cdot 10^{-6}$ V.



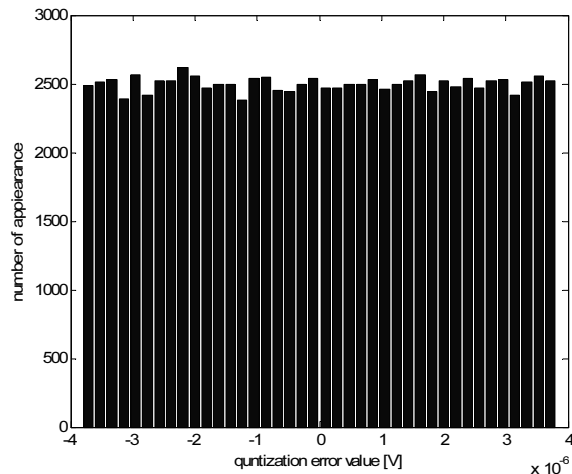
Rys. 3. Przykładowy rozkład błędu wzorca przetwornika Sigma-Delta
Fig. 3. Exemplary distribution of standard error of Sigma-Delta converter

5. Wpływ uśredniania na błędy przetwarzania

W przetworniku Sigma-Delta wykonywane są dwa działania mające na celu podwyższenie jego dokładności: decymacja i filtracja. Decymacja nie wpływa na błąd kwantowania i błąd wzorca, a celem jej użycia jest odpowiednie zmniejszenie błędu wejściowego. Analiza tego błędu wymaga opisu zaburzeń wejściowych (patrz wzór (6)) w określonych warunkach pomiarowych i tutaj nie jest przeprowadzana. Przedmiotem dalszych rozważań jest filtracja w jej najprostszej formie polegającej na uśrednianiu serii wyników pomiaru.

Błąd kwantowania dokonywanego wielokrotnie w jednym okresie próbkowania ma rozkład dwuwartościowy zależny od wartości mierzonego napięcia [6], w związku z czym wynik filtracji w tym przypadku również zależy od wartości napięcia. Oceny wpływu filtracji na błąd kwantowania można dokonać zmieniając wartości napięcia mierzonego równomiernie w całym zakresie pomiarowym.

Na rys. 4 pokazano przykładowy histogram błędu kwantowania przetwornika o takich samych jak uprzednio parametrach (patrz opis rys. 3) uzyskany dla średniej z 32 wskazań z symetryzacją błędu polegającą na odjęciu 0,5 od każdego wskazania [5].



Rys. 4. Przykładowy rozkład błędu kwantowania z uśrednianiem serii wyników
Fig. 4. Exemplary distribution of quantization error with averaging series of results

Dla zmiennych wartości napięcia mierzonego błąd kwantowania 12 bitowego przetwornika ma rozkład jednostajny w granicach od -1 do 1 wartości kwantu napięcia (LSB). Z rys. 5 wynika, że uśrednienie L_{sr} wskazań powoduje zmniejszenie szerokości rozkładu błędu kwantowania L_{sr} razy (symetryzacja błędu powoduje dodatkowe zmniejszenie o 0,5). Oznacza to, że wariancja błędu kwantowania po uśrednieniu wynosi:

$$\sigma_{q, sr}^2 = \frac{q_U^2}{12L_{sr}^2}, \quad (11)$$

gdzie q_U jest kwantem napięcia określonym wyrażeniem (4).

Z kolei ze wzoru (10) wynika, że błąd wzorca na końcu zakresu, czyli dla wskazania n_q równego pojemności licznika k_z , ma po uśrednieniu wartość:

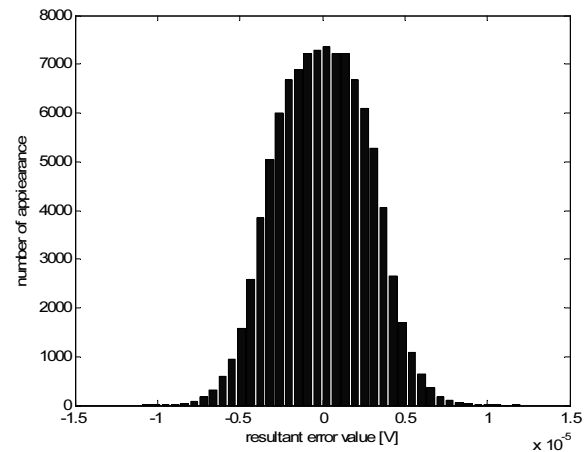
$$\sigma_{wz, sr}^2 = \frac{2k_z r^2}{3L_{sr}}. \quad (12)$$

Z porównania zależności (11) i (12) można wyciągnąć wniosek, że efektywność uśredniania jest większa dla błędu kwantowania niż dla błędu wzorca, a zatem można wskazać maksymalną liczbę wskazań $L_{sr, max}$ powyżej której błąd wzorca dominuje nad błędem kwantowania. Dla równości wariancji (11) i (12) uzyskuje się graniczną wartość $L_{sr, max}$, która wynosi:

$$L_{sr, max} = \frac{q_U^2}{8k_z r^2} = \frac{1}{8k_z r_{rel}^2}, \quad (13)$$

gdzie r_{rel} jest względną zmianą kwantu spowodowaną drzeniem zbroca impulsu określającego czas trwania kwantu.

Przedstawione zależności mogą być stosunkowo prosto weryfikowane w sposób symulacyjny. Na rys. 5 pokazano histogram błędu, będącego wypadkową błędu kwantowania i błędu wzorca, uzyskany przy założeniu, że współczynnik r_{rel} ma wartość 0,1%. Ze wzoru (12) wynika, że dla przetwornika 12 bitowego maksymalna liczba uśrednień wynosi w tym przypadku około 32.



Rys. 5. Przykładowy histogram wypadkowego błędu wzorca i błędu kwantowania
Fig. 5. Exemplary histogram of quantization result error

6. Uwagi końcowe i wnioski

Przedstawiony w pracy sposób analizy metrologicznych właściwości przetwornika Sigma-Delta różni się od sposobów spotykanych w literaturze. Jego istota polega na wyodrębnianiu źródeł błędów i opisywaniu ich w kategoriach probabilistycznych. Pozwala to na wykorzystywanie metody Monte Carlo do wyznaczania histogramów błędów w połączeniu z pomiarową weryfikacją tak uzyskiwanych wyników. Rozkłady błędów mogą być wykorzystywane do analizy przyczyn warunkujących występowanie poszczególnych błędów, a tym samym umożliwiają użycie środków prowadzących do ich zmniejszenia. Przede wszystkim jednak znajomość probabilistycznego opisu błędów pozwala na obliczanie niepewności wyniku pomiaru jako parametru rozkładu błędu wypadkowego tego wyniku, w sposób opisany w pracy [3]. Wyniki badań symulacyjnych opisane w artykule pokazują, że obliczanie niepewności przetwornika Sigma-Delta nie jest zagadnieniem prostym. W literaturze [1] spotyka się opis postępowania polegającego na wyznaczaniu rozkładu błędu wypadkowego na podstawie znajomości wartości skutecznej szumu wyjściowego traktowanej jako odchylenie standardowe błędu o rozkładzie normalnym. Jednak przedstawione wyniki analiz pokazują, że tak uzyskana wartość niepewności może się istotnie różnić od rzeczywistości, gdyż nie uwzględnia faktu, że błąd wzorca zależy od wskazania. Wynika stąd wniosek, że rzetelna ocena niepewności przetwornika Sigma-Delta powinna odbywać się na podstawie znanych rozkładów błędów cząstkowych i ich związków zachodzących w opisanym procesie przetwarzania.

7. Literatura

- [1] Sigma-Delta ADCs and DACs. Application Note AN-238. Strona internetowa Analog Devices.
- [2] Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik. Główny Urząd Miar, 1999.
- [3] Jakubiec J.: System Oriented Mathematical Model of Single Measurement Result. Metrology and Measurement Systems. Vol. XIII, Number 4 (2006), pp. 405-419.
- [4] P. Horowitz, W. Hill.: Sztuka Elektroniki. T 2. WKŁ Warszawa, 2003.
- [5] Jakubiec J.: Błędy i niepewność wyniku kwantowania. PPM'03. Prace Komisji Metrologii Oddz. PAN w Katowicach. Seria: Konf. Nr 5. Gliwice-Ustroń, 11-14.05.2003, ss. 369-382.
- [6] Jakubiec J.: Losowe właściwości błędu kwantowania w systemie pomiarowym. PAK 1-2008, ss. 8-11.