

Krzysztof KONOPKA
Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej
Politechnika Śląska

WYZNACZANIE BŁĘDU DYNAMICZNEGO Z WYKORZYSTANIEM SYGNAŁÓW WZORCOWYCH GENEROWANYCH CYFROWO

Streszczenie. W przypadku pomiaru wartości chwilowych wielkości zmiennej w czasie nieskorygowany błąd dynamiczny należy uwzględnić w budżecie niepewności. Tworzenie modeli niepewności torów pomiarowych niesie ze sobą konieczność ich weryfikacji. Jeżeli podczas doświadczalnej weryfikacji modelu niepewności zastosuje się generator cyfrowy, nieciągły charakter sygnału powoduje dodatkowe błędy dynamiczne, które wpływają na jakość weryfikacji modelu. W artykule rozważane są sposoby zminimalizowania wpływu wspomnianych dodatkowych błędów.

DYNAMIC ERROR EVALUATION USING DIGITAL GENERATED STANDARD SIGNALS

Summary. When instantaneous values of time variable signal are measured, one should consider influence of uncorrected dynamic error in uncertainty budget. In such conditions final uncertainty is calculated using uncertainty model. This model should be verified before use. Verification procedure requires digital function generator. Stepped testing waveform causes additional dynamic errors which influence verification quality. The paper considers how to minimize the influence of mentioned errors.

1. WSTĘP

Każdy wynik pomiaru powinien zawierać informację o dokładności, z jaką pomiar został wykonany. Zatem, aby wynik ten był w jakikolwiek sposób użyteczny, należy oszacować błędy i niepewności, którymi jest obarczony. Jeśli mezurand jest wielkością zmienną w czasie, jednym z błędów pomiaru jest błąd dynamiczny.

Błąd dynamiczny jest ze swej natury błędem systematycznym, deterministycznym. Jako taki po przeprowadzonej analizie dokładności pomiaru powinien zostać usunięty z pomiaru, skorygowany. W praktyce, jeśli jest on wystarczająco mały, nie koryguje się go. Zresztą, nawet jeśli wykonywana jest korekcja błędu dynamicznego, to nigdy nie jest ona idealna i pozostają nieusunięte „resztki” tego błędu [6,11]. W przypadku sygnałów okresowych ta część błędów dynamicznych, która nie jest korygowana, powinna zostać uwzględniona w budżecie niepewności, ponieważ błędy te również wpływają na dokładność pomiaru, której miarą jest

niepewność [12,6,8]. Można też mówić w przypadku sygnałów okresowych, że błąd dynamiczny daje pewien rozrzut wyników, o kształcie zależnym od kształtu sygnału.

Powyższe rozważania są wynikiem badań prowadzonych w celu zamodelowania niepewności w torach pomiarowych z przetwarzaniem analogowo-cyfrowym. Przetwarzanie A/C jest obecnie powszechnym sposobem wykonywania pomiarów. W urządzeniach pracujących w nowoczesnych systemach pomiarowych przetworniki analogowe stanowią jedynie pierwsze, wstępne ogniwo przetwarzania. Wyniki pomiaru przetwarzane są następnie na postać cyfrową i poddawane dalszej obróbce programowej. W takich torach przetwarzania analogowo-cyfrowego wielkość mierzona często zmienia się w czasie [9], na przykład gdy celem pomiaru jest odtworzenie mierzonego przebiegu. W takim przypadku nie można wykonać wielokrotnego pomiaru tej samej wielkości wejściowej, ponieważ wielkość ta jest inna za każdym razem. Nie można zatem określić rozrzutu wartości wielkości mierzonej wokół wartości prawdziwej. Niepewność można wówczas wyznaczyć na podstawie modelu niepewności [10,13,14,15].

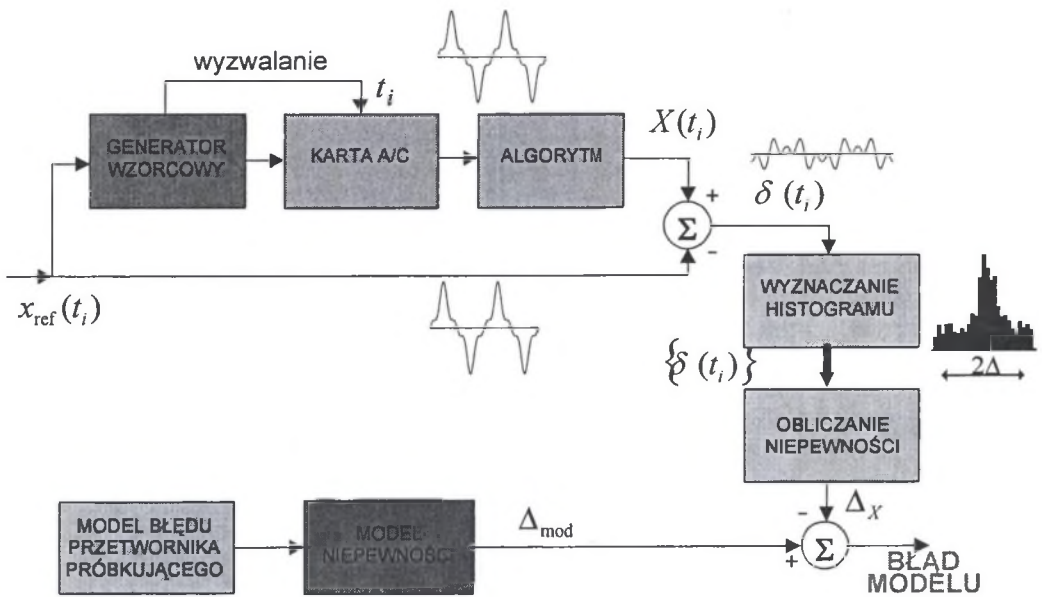
Tworząc modele niepewności, należy je weryfikować. W Instytucie Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej opracowano metodę doświadczalnej weryfikacji modelu niepewności, w której źródłem wzorcowego sygnału wejściowego toru jest cyfrowy generator funkcyjny [1]. Zastąpienie ciągłego sygnału wejściowego sygnałem schodkowym wprowadza dodatkowe błędy dynamiczne. Problem polega na tym, aby tak przeprowadzić eksperymenty, by błąd dynamiczny wyznaczany za pomocą przebiegu schodkowego był taki sam jak błąd dla przebiegu ciągłego.

2. PROCEDURA WERYFIKACJI MODELU NIEPEWNOŚCI

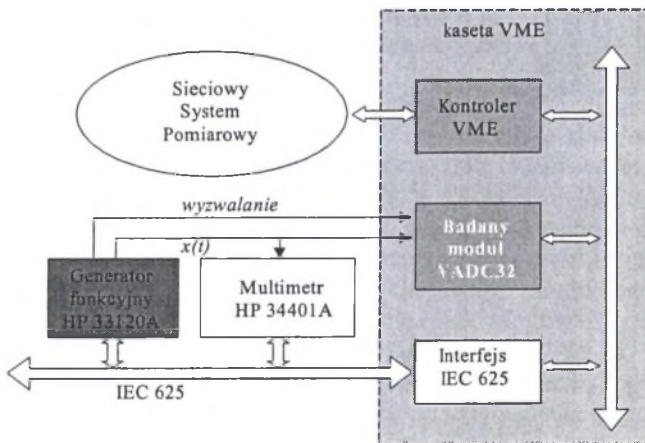
Dla jasności, przeprowadzenie rozważań rozpocząć należy od krótkiego przedstawienia opracowanej procedury weryfikacji modelu niepewności [1]. Schemat tej procedury pokazano na rysunku 1.

Niepewność wyznaczona z modelu niepewności porównywana jest z niepewnością wyznaczoną doświadczalnie - obliczoną z definicji ze zbioru błędów. Ten zbiór błędów można wyznaczyć tylko w specyficznych warunkach. Mianowicie, trzeba tak wykonać pomiary, aby w danej chwili czasu znana była wartość chwilowa wielkości na wejściu i na wyjściu toru – ich różnica stanowi błąd wprowadzany przez cały tor. W tym celu sygnał na wejście toru podawany jest z generatora, który można programować dowolnym ciągiem próbek. Generator ten generuje też impuls inicjujący konwersję A/C przez kartę. Zatem, skoro znane są wartości chwilowe na wejściu i na wyjściu toru, można określić zbiór błędów i na jego podstawie niepewność. Weryfikacji modelu niepewności dokonuje się w różnych warunkach, szczególnie w takich, aby niepewności cząstkowe uwzględnione w tym modelu były podobnego rzędu.

Przykładowe pomiary wykonywano przy użyciu systemu pomiarowego będącego na wyposażeniu Instytutu [1,7]. Jest to system sieciowy składający się kilku komputerów oraz kasyety pomiarowej w standardzie VMEbus zarządzany systemem operacyjnym czasu rzeczywistego QNX. Obiektem badań, dla którego budowano i weryfikowano model niepewności, była karta VADC32 zabudowana w kasecie VME. Źródłem przebiegu wzorcowego był generator funkcyjny HP 33120A, który w celu podniesienia dokładności był wzorcowany za pomocą woltomierza HP 34401A. Oba te urządzenia sterowane były interfejsem IEC 625.



Rys. 1. Schemat procedury weryfikacji modelu niepewności
 Fig. 1. Scheme of uncertainty model verification procedure



Rys. 2. Schemat przykładowego systemu pomiarowego, dla którego budowano i weryfikowano model niepewności

Fig. 2. Scheme of measuring system used as an example for uncertainty model construction and verification

Do zbudowania modelu niepewności niezbędny jest model błędów toru oraz probabilistyczny opis błędów cząstkowych, czyli parametry ich rozkładów. Niezbędne dane można czasem uzyskać z dokumentacji producenta, jednak często są one niewystarczające, nie podaje się na przykład założeń przyjętych przy wyznaczaniu parametrów albo nie jest

podawany przyjęty poziom ufności, rzadko podawany jest kształt rozkładu błędu. W takim przypadku trzeba zidentyfikować źródła błędów[1,3,4,5]. Jednym z błędów, które należy uwzględnić w modelu, jest, jak wspomniano wcześniej, błąd dynamiczny.

3. IDENTYFIKACJA BŁĘDU DYNAMICZNEGO

Istnieje wiele miar błędu dynamicznego, stosowanych w zależności od tego, w jakim celu szacujemy ten błąd, na przykład różne kryteria całkowite dla wymuszeń skokowych czy też charakterystyki częstotliwościowe dla sygnałów okresowych.

W artykule rozpatrywane są małe błędy dynamiczne, które nie są korygowane i najwygodniej uwzględnić je w budżecie niepewności. Dodatkowo, aby można było mówić o wpływie tego błędu na niepewność, trzeba ograniczyć rozważania do sygnałów okresowych. Dla sinusoidalnej wielkości przetwarzanej błąd dynamiczny również jest sinusoidalny. Można przyjąć z pewnym przybliżeniem, że źródło tego błędu jest źródłem niepewności o wartości równej amplitudzie tego błędu. Dla sygnałów innych niż sinusoidalny można rozpatrywać błąd dynamiczny oddzielnie dla każdej harmonicznej i potem wyznaczyć amplitudę wypadkową [1,6,8].

Dla tak zakreślonych potrzeb wynikiem identyfikacji błędu dynamicznego powinna być amplituda i ewentualnie przesunięcie fazowe błędu dynamicznego. Informacje takie uzyskamy, jeśli zidentyfikujemy model dynamiki badanego toru przetwarzania.

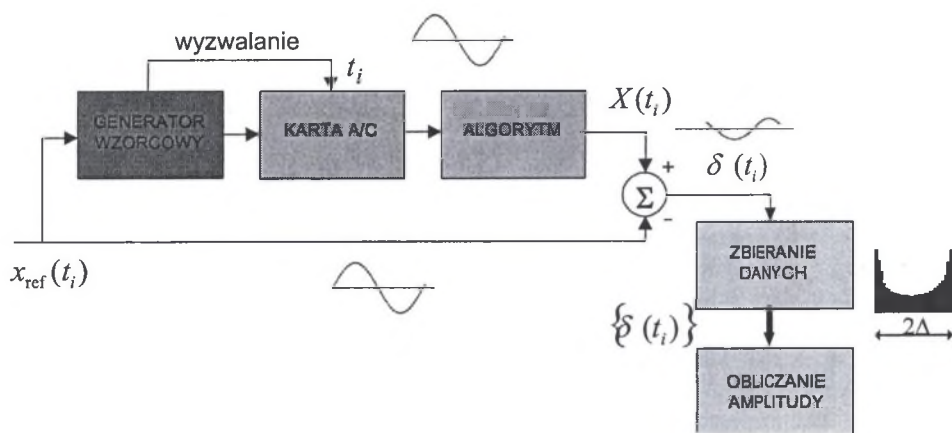
Model ten można zidentyfikować na kilka sposobów. Klasyczny sposób polega na wyznaczaniu charakterystyki amplitudowej i fazowej. Trzeba jednak wziąć pod uwagę, że rozważamy bardzo małe błędy, na poziomie szumów, oraz że wielkości wejściowa i wyjściowa mierzone są cyfrowo, z określoną rozdzielczością. Może się zatem zdarzyć, że rozdzielczość użytego w systemie pomiarowym przetwornika A/C oraz okres próbkowania uniemożliwią wyznaczenie tych charakterystyk.

W takim przypadku model dynamiki toru można wyznaczyć z amplitudy błędu dynamicznego. Amplituda ta dla wartości chwilowych wielkości mierzonej jest dużo większa od różnicy amplitud wielkości wejściowej i wyjściowej jako że wpływ na nią ma też przesunięcie fazowe. W taki sposób zidentyfikowano model dynamiki przykładowej karty VADC32 [1]. Badania przeprowadzono w ten sposób, że z generatora funkcyjnego HP 33120A zadawano na wejście karty przebieg sinusoidalny o ustalonej amplitudzie i częstotliwości. Generator podawał też impuls wyzwalania równocześnie z pierwszą próbką przebiegu, który taktował konwersję przetwornika A/C karty. Wynik pomiaru kartą A/C porównywany był z wartością zadaną, a ich różnica stanowiła sumaryczny błąd wprowadzany przez tor przetwarzania. Przy odpowiednio dobranej częstotliwości zadawanej sinusoidy błąd dynamiczny dominuje, można więc uznać, że wyznaczony w ten sposób błąd równy jest błędowi dynamicznemu.

Aby można było porównywać wynik pomiaru kartą A/C z wartością zadaną, wartość ta w chwili konwersji musi być znana. Skorzystano w tym celu z funkcji generatora umożliwiającej generowanie przebiegu zdefiniowanego przez użytkownika. Umożliwia ona zadanie dowolnego przebiegu składającego się z 8 do 16 000 próbek. Dodatkowo przy wystawianiu pierwszej próbki generowany jest impuls wyzwalania, który umożliwia zsynchronizowanie pomiaru z generatorem. Przesuwając przebieg, można zbadać wszystkie próbki zadanego sygnału. Efektem każdego pojedynczego pomiaru była para liczb: wartość zadana na

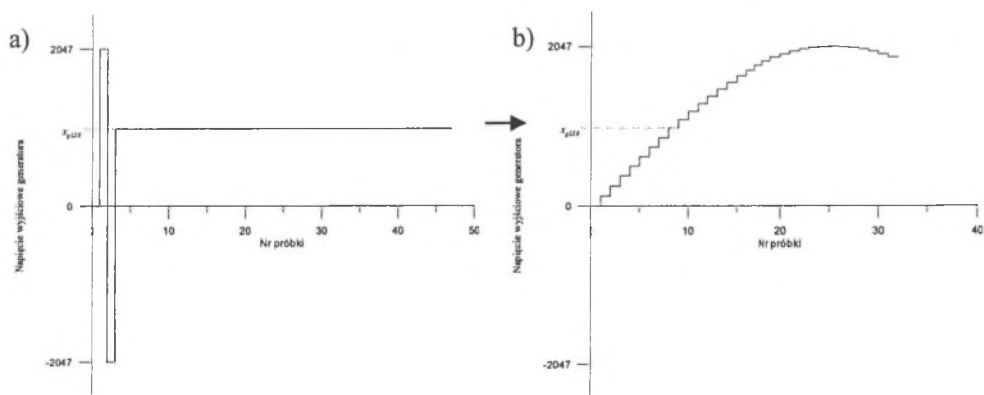
generatorze x_{gLSB} (liczba całkowita z zakresu od -2 047 do +2 047) oraz wynik konwersji analogowo-cyfrowej $x_{A/DLSB}$ (liczba całkowita z zakresu od 0 do 4 096).

Aby zwiększyć dokładność pomiarów, zmierzono rzeczywistą charakterystykę generatora $x_g = f(x_{gLSB})$. Charakterystykę tę wyznaczono w postaci tabeli o 4 096 wierszach, w której każdej możliwej wartości próbki (x_{gLSB}) przyporządkowano rzeczywistą wartość napięcia zmierzoną multimetrem HP 34401A. Aby zmierzyć woltomierzem napięcie odpowiadające danej próbce, trzeba wystawić napięcie stałe odpowiadające tej próbce. Generowano w tym celu specjalny przebieg przedstawiony na rysunku 4. Zmieniając wartość zadawaną w zakresie od -2 047 do +2 047, uzyskano rzeczywiste charakterystyki generatora dla różnych amplitud przebiegu wyjściowego.



Rys. 3. Wyznaczanie amplitudy błędu dynamicznego

Fig. 3. Dynamic error amplitude evaluation



Rys. 4. Przebieg testowy a) umożliwia zmierzenie rzeczywistej wartości zadawanego napięcia dla pojedynczej próbki napięcia zmiennego b) przy tej samej amplitudzie obu przebiegów

Fig. 4. Using test signal a) one can measure true value of generated single sample of alternating signal b), assuming the same amplitudes

Po wyznaczeniu wartości chwilowych wejściowego i wyjściowego sygnału sinusoidalnego można wyznaczyć błąd wypadkowy, który w określonych warunkach równy jest błędowi dynamicznemu. Amplitudę tego błędu najłatwiej wyznaczyć z histogramu.

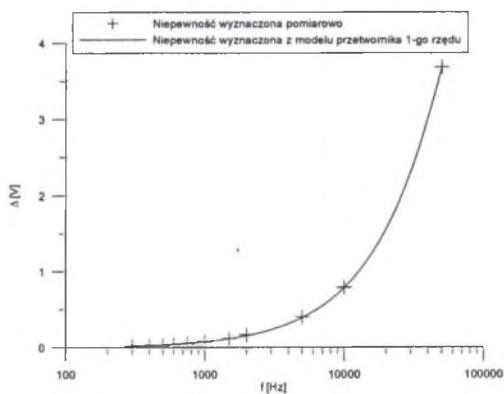
Właściwości dynamiczne przykładowej karty aproksymowano kilkoma modelami. Wyniki wskazują, że wystarczająco dobrym modelem jest przetwornik dynamiczny pierwszego rzędu. Amplituda błędu dynamicznego w takim przypadku dana jest wzorem:

$$\Delta_{\text{dyn}} \equiv \left| \delta_{\text{dyn}}(j\omega) \right| = \frac{\omega T}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} \quad (1)$$

Jest to równanie z jedną niewiadomą. Wyliczona z niego stała czasowa T ma wartość

$$T = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ s} \quad (2)$$

Na rysunku 5 przedstawiona jest amplituda błędu dynamicznego wyznaczona pomiarowo z przedstawionych wcześniej histogramów oraz jej aproksymacja modelem dynamiki pierwszego rzędu.

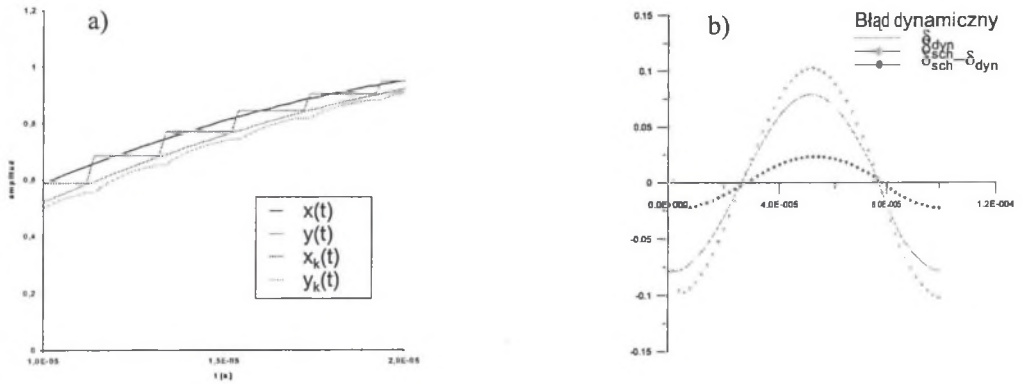


Rys. 5. Amplituda błędu dynamicznego wyznaczona pomiarowo i aproksymacja modelem dynamiki pierwszego rzędu

Fig. 5. Dynamic error amplitude determined by measurements and by first order dynamic model

4. BŁĄD DYNAMICZNY SPOWODOWANY NIECIĄGŁYM CHARAKTEREM SYGNAŁU WEJŚCIOWEGO

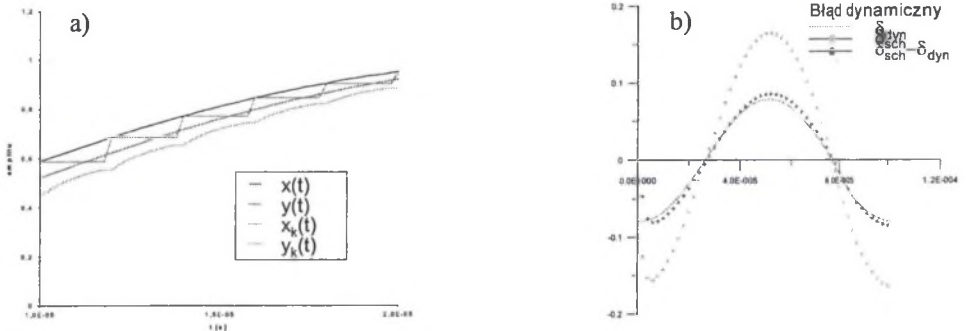
Po zidentyfikowaniu wszystkich źródeł błędów można zbudować model błędów, a na jego podstawie model niepewności toru pomiarowego [1,10,13]. Model taki można następnie weryfikować, zgodnie z procedurą przedstawioną w rozdziale drugim. O ile jednak model budowany jest dla ciągłej wielkości wejściowej, o tyle weryfikacja przeprowadzana jest za pomocą sygnału generowanego cyfrowo, który składa się ze schodków. W takim przypadku pojawia się dodatkowy błąd dynamiczny, ponieważ odpowiedź na wymuszenie schodkowe różni się od odpowiedzi na wymuszenie ciągłe. Należy zatem zadać pytanie, czy da się tak wykonać eksperyment, aby zminimalizować ten dodatkowy błąd, czyli aby różnica między wartościami chwilowymi odpowiedzi toru na przebieg schodkowy wyznaczanymi w momencie wyzwalania pomiaru a wartościami chwilowymi odpowiedzi na sygnał ciągły w tych samych momentach była jak najmniejsza (rys. 6).



Rys. 6 a) Sygnał wejściowy ciągły $x(t)$ i schodkowy $x_k(t)$, oraz odpowiadające im sygnały wyjściowe $y(t)$ i $y_k(t)$; b) Błąd dynamiczny dla ciągłego sygnału wejściowego δ_{dyn} , dla schodkowego sygnału wejściowego δ_{sch} , oraz ich różnica

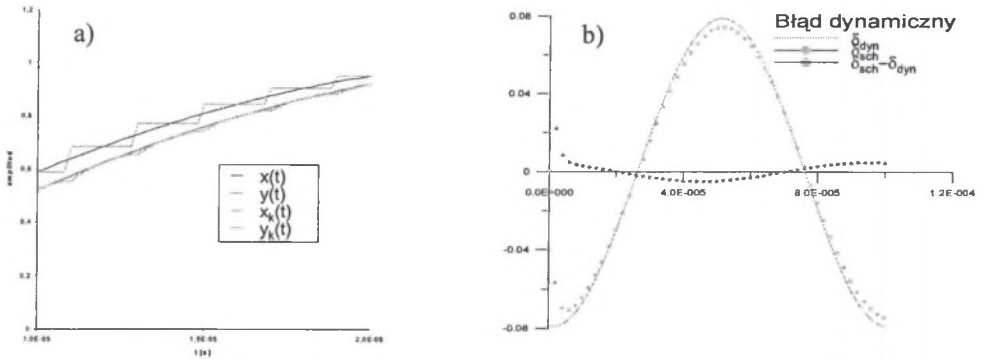
Fig. 6 a) Continuous input waveform $x(t)$ and stepped input waveform $x_k(t)$ and corresponding output waveforms $y(t)$ and $y_k(t)$; b) Dynamic error for continuous input waveform δ_{dyn} , for stepped input waveform δ_{sch} , and their difference

Badania symulacyjne wskazują, że różnicę między wartościami chwilowymi błędów dynamicznych dla przebiegu ciągłego i schodkowego można zmniejszyć przesuując moment wyzwania pomiaru, co ilustrują rysunki 6, 7 i 8. Na rysunkach tych widać, że można doprowadzić do sytuacji, gdy błąd dynamiczny dla przebiegu schodkowego będzie mniejszy od błędu dla przebiegu ciągłego. Jest to również sytuacja niepożądana jako że celem badań nie jest minimalizacja tego błędu, tylko jak najwierniejsze odwzorowanie warunków rzeczywistych w celu sprawdzenia trafności oszacowania niepewności pomiaru.



Rys. 7. Sytuacja, gdy nie przesuwano momentu wyzwania pomiaru – błąd dynamiczny dla przebiegu schodkowego jest dwa razy większy od błędu dla przebiegu ciągłego. Rysunki a) i b) przedstawiają te same sygnały co na rysunku 6

Fig. 7. Situation when trigger moment was not moved – dynamic error for stepped waveform is twice as big as the error for continuous waveform. Figures a) and b) present the same signals as in Fig. 6



Rys. 8. Sytuacja, gdy tak przesunięto moment wyzwalania pomiaru, że błąd dynamiczny dla przebiegu schodkowego jest mniejszy od błędu dla przebiegu ciągłego. Rysunki a) i b) przedstawiają te same sygnały co na rysunku 6

Fig. 8. Situation when trigger moment was so moved that dynamic error for stepped waveform is lower than the error for continuous waveform. Figures a) and b) present the same signals as in Fig. 6

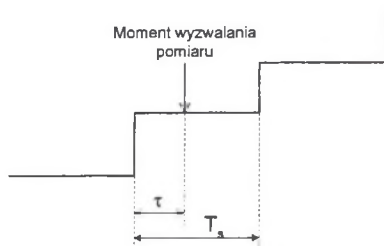
Przydatne w praktyce byłoby określenie, jakie powinno być przesunięcie momentu wyzwalania pomiaru, aby różnica między błędami dynamicznymi dla przebiegów ciągłego i schodkowego była jak najmniejsza. Przeprowadzone badania symulacyjne wskazują, że dla ustalonych parametrów dynamicznych toru przesunięcie to, wyrażone w procentach okresu wystawiania próbek przez generator, jest funkcją iloczynu częstotliwości generowanego sygnału i liczby generowanych próbek na okres. Przykładowe wartości przesunięć przedstawione są w tabeli 1.

Tabela 1

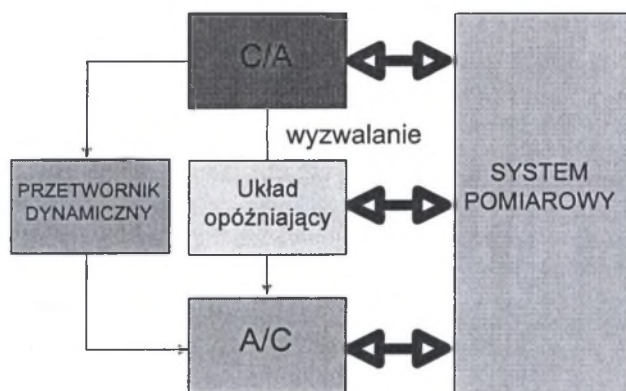
Przesunięcie momentu wyzwalania pomiaru (rys. 9), dla którego $(\delta_{sch} - \delta_{dyn}) \rightarrow \min$, w funkcji iloczynu częstotliwości generowanego sygnału f i liczby generowanych próbek na okres N . Przyjęto przetwornik inercyjny pierwszego rzędu o stałej czasowej $T = 1,26 \cdot 10^{-6}$ s

fN	Przykład	Przesunięcie: $\left(\frac{\tau}{T_s} 100\% \right)$
500k	$f=10$ kHz, $N=50$ $f=1$ kHz, $N=500$ $f=5$ kHz, $N=100$	44%
250k	$f=5$ kHz, $N=50$ $f=500$ Hz, $N=500$ $f=2.5$ kHz, $N=100$	38%
50k	$f=1$ kHz, $N=50$ $f=100$ Hz, $N=500$ $f=500$ Hz, $N=100$	17%
25k	$f=500$ Hz, $N=50$ $f=50$ Hz, $N=500$ $f=250$ Hz, $N=100$	11%

Obecnie trwają prace nad zbudowaniem stanowiska, na którym będzie można sprawdzać omawiane zagadnienia praktycznie. Ogólny schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 9. Interpretacja graficzna przesunięcia przedstawionego w tabeli 1
 Fig. 9. Graphical interpretation of triggering move presented in table 1



Rys. 10. Stanowisko do badania wpływu opóźnienia wyzwalania pomiaru na błąd dynamiczny
 Fig. 10. A stand for testing the influence of triggering move on the dynamic error

5. PODSUMOWANIE

Podsumowując przedstawione rozważania, trzeba zauważyć, że modelując niepewność pomiaru wartości chwilowej wielkości zmiennej w czasie w torach przetwarzania analogowo-cyfrowego należy wziąć pod uwagę także błąd dynamiczny.

Jeśli podczas doświadczalnego wyznaczania niepewności zastąpi się ciągły sygnał wejściowy sygnałem schodkowym, spowoduje to wprowadzenie dodatkowych błędów dynamicznych. Błędy te sumują się z błędami dynamicznymi toru zawyżając je lub zaniżając.

Przesuwając moment wyzwalania konwersji a-c, można uzyskać sytuację, w której amplituda zmierzonego błędu dynamicznego toru dla przebiegu schodkowego jest taka jak amplituda błędu dla sygnału ciągłego.

Literatura

1. Konopka K.: *Modelowanie niepewności w torach przetwarzania analogowo-cyfrowego*. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2004.

2. Konopka K., Żurkowski R.: *Obliczanie niepewności danych wyjściowych przetwornika próbkującego*. Podstawowe Problemy Metrologii PPM'03, Ustroń, 12-14 maja 2003, s. 395-406.
3. Jakubiec J., Konopka K.: *Wyznaczanie rozkładów błędów toru przetwarzania analogowo-cyfrowego*. Podstawowe Problemy Metrologii PPM'03, Ustroń, 12-14 maja 2003, s. 383-394.
4. Jakubiec J., Konopka K.: *Identification Method of Error Sources of A/D Measuring Chain*. IEEE IMTC 2003 – Instrumentation and Measurement Technology Conference Vail, CO, USA, 20-22 May 2003.
5. Żurkowski R., Konopka K.: *Identyfikacja źródeł błędów przetwarzania próbkującego*. IV Ogólnopolskie Warsztaty Doktoranckie, Zeszyt 5, Istebna-Zaolzie 2002.
6. Konopka K.: *Niepewność korekcji dynamicznej wyznaczana przy użyciu redukcyjnej arytmetyki interwałowej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Nr 1540, s. Elektryka z. 181, Gliwice 2002, s. 83-94.
7. Żurkowski R., Konopka K.: *Stanowisko pomiarowe do identyfikacji źródeł błędów przetwarzania próbkującego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Nr 1540, s. Elektryka z. 181, Gliwice 2002, s. 229-234.
8. Jakubiec J., Konopka K.: *Reducing Interval Arithmetic in Dynamic Error Evaluation*. IMEKO TC-4 Working Group on A/D and D/A Converter Metrology 5th Workshop on ADC Modelling and Testing Vienna, Austria, 26 – 28 września 2000.
9. Winiecki W.: *Organizacja komputerowych systemów pomiarowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
10. Jakubiec J.: *Redukcyjna arytmetyka interwałowa w zastosowaniu do wyznaczania niepewności algorytmów przetwarzania danych pomiarowych. Application of Reductive Interval Arithmetic to uncertainty Evaluation of Measurement Data Processing Algorithms*. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
11. Jakubiec J.: *Bieżące programowe odtwarzanie wartości chwilowych dynamicznych przebiegów wejściowych nieliniowych przetworników pomiarowych*. ZN Politechniki Śląskiej, Elektryka z. 111, Gliwice 1988.
12. *Wyrażanie niepewności pomiaru*. Przewodnik. Główny Urząd Miar, 1999.
13. Jakubiec J., Roj J.: *Metoda modelowania niepewności*. Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i w Przemysle, 1998.
14. Jakubiec J.: *Wyznaczanie niepewności danych w systemie pomiarowym z wykorzystaniem redukcyjnej arytmetyki interwałowej*. Pomiary Automatyka Kontrola 7/8 2002.
15. Ghani E., Locci N., Muscas C.: *Auto-evaluation of uncertainty In virtual instruments*. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 21-23 May 2002, Anchorage, USA.
16. Hagel R., Zakrzewski J.: *Miernictwo dynamiczne*. WNT, Warszawa 1984.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Adam Żuchowski

Wpłynęło do Redakcji dnia 7 grudnia 2004

Abstract

When instantaneous values of time variable signal are measured, one should consider influence of uncorrected dynamic error in uncertainty budget. In such conditions final uncertainty is calculated using uncertainty model. This model should be verified before use. Chapter 2 presents verification procedure of the model. It consists in comparing uncertainty calculated using the model with the one determined experimentally basing on digitally generated input signal. Discrete input signal produces additional dynamic errors which influence the quality of model verification. Chapter 4 presents the approach to correct these errors caused by verification method. It consists in such moving the triggering moment, that the error caused by stepped input waveform is minimized. Table 1 presents exemplary delays for different input signal parameters with the measuring chain dynamic parameters assumed.