

Roman ŻURKOWSKI

Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej

Politechnika Śląska

WYZNACZANIE NIEPEWNOŚCI WYNIKU POMIARU W SYSTEMIE CZASU RZECZYWISTEGO Z UWZGLĘDNIENIEM OPÓŹNIEŃ

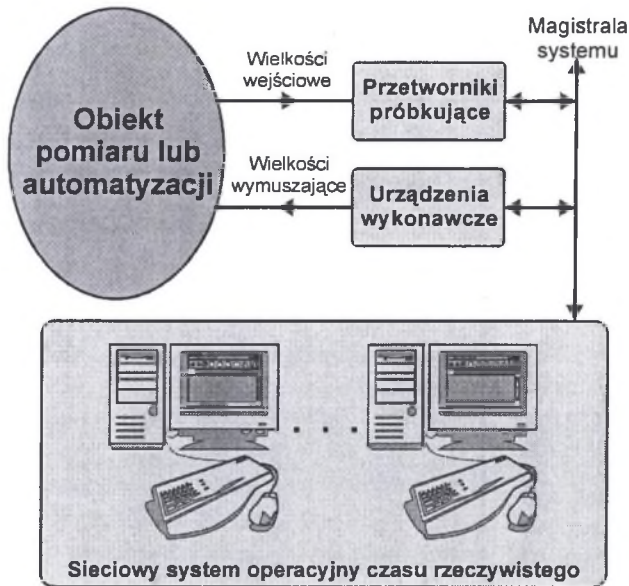
Streszczenie. Podstawowym parametrem systemów czasu rzeczywistego jest czas potrzebny na zebranie i przetworzenie informacji o stanie obiektu oraz podjęcie na ich podstawie działań sterujących. W artykule scharakteryzowano typowe przyczyny powstawania opóźnień w systemach pomiarowych i ich wpływ na błędy danych pomiarowych. W postaci histogramu przedstawiono wyniki pomiarów opóźnień wykonanych w przykładowym systemie. W artykule umieszczono model propagacji błędów w systemie uwzględniający opóźnienia. Model propagacji błędów stanowi podstawę do wyznaczenia niepewności w systemie.

UNCERTAINTY EVALUATION OF MEASUREMENT RESULT TAKING INTO CONSIDERATION DELAYS IN REAL-TIME SYSTEM

Summary. Basic parameter of real-time systems is time consumed to assembly and process information about object and to start control procedures. This article characterize typical sources of delays in measuring systems and their influence on measuring data errors. Delays were measured in exemplary system and presented as histograms. The model of error propagation in real-time system including errors caused by delays was evaluated. This emodel is the base to calculate uncertainty in system.

1. WPROWADZENIE

Budowane współcześnie systemy pomiarowo-sterujące często pracują pod kontrolą systemów operacyjnych czasu rzeczywistego (ang. Real Time Operating System). Jednym z reprezentantów tego rodzaju systemów operacyjnych jest QNX [1]. Ogólnie system pomiarowo-sterujący może być przedstawiony w sposób pokazany na rys.1.



Rys. 1. Ogólna struktura systemu pomiarowo-sterującego
 Fig. 1. General structure of measuring-control system

Źródłem danych w systemie są przetworniki próbkujące [2], które z określoną częstotliwością dostarczają kolejnych wyników pomiaru wartości chwilowych wielkości mierzonych. Wyniki te poprzez magistralę interfejsu rozprowadzane są w całym systemie.

System po odebraniu danych pomiarowych, przetwarza je i podejmuje odpowiednie działania sterujące (poprzez urządzenia wykonawcze).

Pomiędzy chwilą wykonania pomiaru a podjęciem działań sterujących upływa pewien czas, który można nazwać czasem reakcji bądź opóźnieniem reakcji systemu. Źródłem opóźnień reakcji systemu są różne jego elementy, w niniejszej pracy przedstawione są jedynie opóźnienia związane z pracą sieciowego systemu operacyjnego QNX, nadzorującego pracę systemu pomiarowo-sterującego. Dla uproszczenia analizy założono ponadto, że system nie przetwarza wyników pomiaru, a jedynie transmituje je pomiędzy przetwornikami próbkującymi a urządzeniami wykonawczymi.

2. BŁĄD POWODOWANY OPÓŹNIENIEM

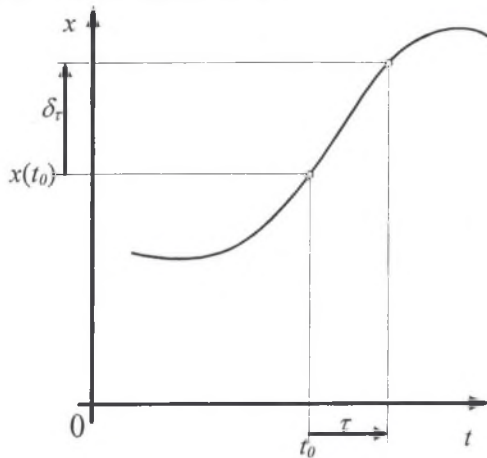
Opóźnienia reakcji systemu można interpretować jako źródło błędów danych pomiarowych powstających w sposób pokazany na rys. 2. Po wykonaniu pomiaru wielkości $x(t)$ w chwili t_0 otrzymuje się wartość $x(t_0)$. Wynik pomiaru dociera do urządzenia wykonawczego z pewnym opóźnieniem τ . Wielkość mierzona $x(t)$ zmienia się w czasie. W chwili wykorzystania (w urządzeniu wykonawczym) wyniku pomiaru rzeczywista wartość wielkości mierzonej jest więc inna niż w chwili wykonywania pomiaru i wynosi $x(t_0 + \tau)$.

Różnica tych wartości stanowi błąd spowodowany opóźnieniem reakcji systemu. Wartość tego błędu zależy od szybkości zmian mierzonej wielkości i od wartości opóźnienia τ , można go wyrazić następującym wzorem

$$\delta_r(t_0) = x(t_0) - x(t_0 + \tau), \quad (1)$$

gdzie:

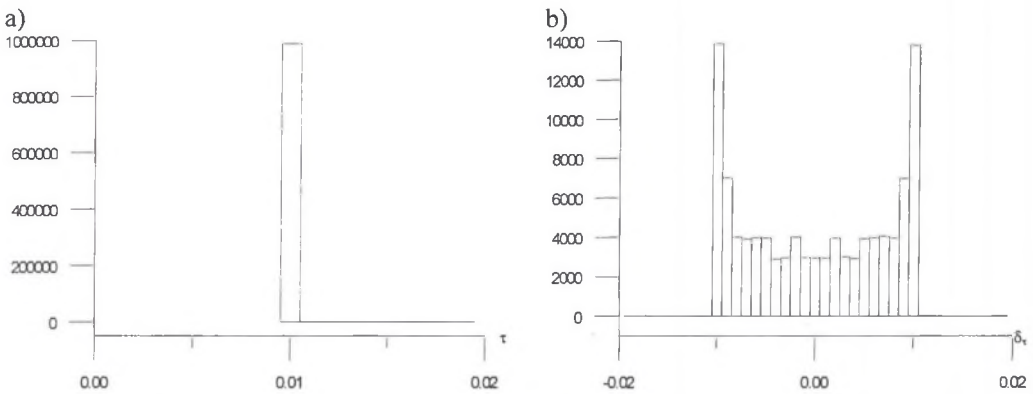
$x(t)$ – przebieg wartości mierzonej, τ – opóźnienie reakcji systemu, $\delta(\tau)$ – błąd powodowany opóźnieniem, t_0 – chwila wykonania pomiaru.



Rys. 2. Ilustracja powstawania błędu powodowanego opóźnieniem

Fig. 2. Illustration of arising the error caused by result propagation delay in the system

W systemie pracującym w czasie rzeczywistym opóźnienie pomiędzy chwilą wykonania pomiaru a chwilą, kiedy wynik pomiaru inicjuje działania sterujące, nie przekracza akceptowalnej wartości maksymalnej. Opóźnienia powodowane są przez wiele czynników zarówno o charakterze deterministycznym, jak i losowym. Jako że systemy czasu rzeczywistego pracują z reguły w sposób ciągły, pomiary wykonywane są wielokrotnie. Można więc zbiór opóźnień $\{\tau\}$ (histogram z rys. 3a) przekształcić w zbiór błędów $\{\delta(\tau)\}$ (histogram z rys. 3b) wykorzystując zależność (1). Wynika z tego, że punktem wyjścia do analizy niepewności związanej z opóźnieniami reakcji systemu jest wyznaczenie opóźnień cząstkowych. W systemie pracującym w czasie rzeczywistym, znając maksymalną szybkość zmian wielkości mierzonej, można określić dopuszczalne opóźnienie, które nie spowoduje powstania błędów większych od założonych.



Rys. 3. Przykładowe histogramy: a) opóźnień, b) błędów dla sinusoidalnie zmiennej wartości wielkości mierzonej

Fig. 3. Exemplary histogram of a) delays, b) errors for sinusoidal measurement quantity

3. ŹRÓDŁA OPÓŹNIEŃ W SYSTEMIE OPERACYJNYM

W wielozadaniowych systemach operacyjnych czasu rzeczywistego definiuje się kilka źródeł opóźnień reakcji systemu [3], są nimi:

- czas przełączania zadań (wątków),
- opóźnienie „przerwania”, czyli czas potrzebny systemowi na przyjęcie zgłoszenia przerwania i przejście do podprogramu jego obsługi,
- czas powrotu z podprogramu obsługi przerwania,
- dostęp do systemu plików,
- synchronizacja międzyprocesowa, w tym również komunikacja.

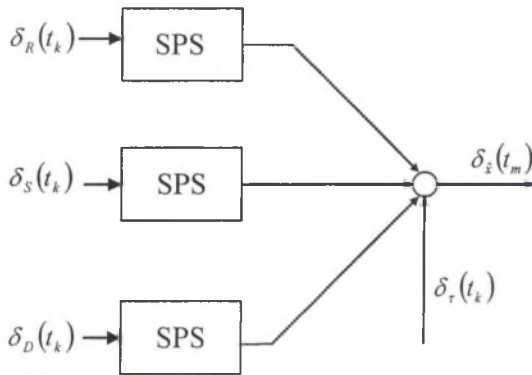
W celu wykonania pomiarów opóźnień zbudowano przyrząd [4], którego podstawowe parametry to:

- pomiar czasu reakcji z rozdzielczością $< 0,1 \mu\text{s}$,
- generacja impulsów (zdarzeń) z częstotliwością $> 10 \text{ kHz}$,
- interfejs USB do komunikacji komputerem PC,
- możliwość rejestracji czasu reakcji z 8 wejść,
- generacja zdarzeń na 2 wyjściach.

Oprogramowanie stworzone do obsługi przyrządu do pomiaru opóźnień pozwala na gromadzenie wyników pomiarów i późniejsze przetworzenie ich w histogram. Przykładowy histogram opóźnień przedstawiono na rys. 3a.

4. MODEL PROPAGACJI BŁĘDÓW

Każdy wynik pomiaru dostarczony przez przetwornik próbkujący obarczony jest błędem, czyli jest to suma wartości poprawnej i błędu. Stosując zasadę superpozycji, można rozdzielnie analizować propagację sygnału i błędów. Model propagacji błędów w systemie przedstawiono na rys. 4. i wyróżniono w nim cztery źródła błędów.



Rys. 4. Model propagacji błędów w systemie pomiarowo-sterującym
 Fig. 4. Error propagation model in the measuring-control system

Błąd powodowany szumami δ_S , kwantowania δ_R oraz dynamiczny δ_D - to błędy, którymi obarczone są wyniki pomiarów dostarczane przez przetworniki próbkujące. W systemie pomiarowo-sterującym (SPS) może powstać błąd powodowany opóźnieniem δ_r .

5. MODEL NIEPEWNOŚCI

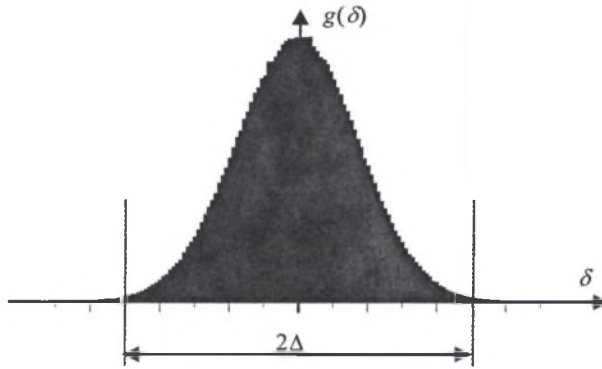
Błąd wypadkowy na wyjściu systemu określa dokładność przetwarzania. Powszechnie przyjmuje się, że liczbowym wyrazem dokładności jest niepewność w rozpatrywanym przypadku traktowana jako parametr zbioru wartości błędu wypadkowego na wyjściu systemu. W niniejszej pracy zastosowano definicję [5] opartą na założeniu, że znany jest zbiór wartości błędu $\{\delta\}$, składający się z liczb rzeczywistych i opisanych funkcją gęstości prawdopodobieństwa $g(\delta)$, która przyjmuje wartości nieujemne i ograniczone, a ponadto jest symetryczna względem zera i malejąca do zera dla $\delta \rightarrow \pm\infty$. Niepewnością Δ na poziomie α nazywany jest parametr wyznaczany na zbiorze $\{\delta\}$ w taki sposób, że zachodzi

$$\frac{1}{F} \int_{-\Delta}^{+\Delta} g(\delta) d\delta = \alpha, \quad (2)$$

gdzie

$$F = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\delta) d\delta. \quad (3)$$

Dla losowej funkcji gęstości współczynnik $F=1$. Gdy definicja jest stosowana dla innego rodzaju błędów (opisywanych za pomocą histogramu lub zależnościami deterministycznymi), wyrażenie (3) normuje wartości niepewności, dzięki czemu jest ona wyznaczana jednolicie i niezależnie od sposobu interpretacji funkcji gęstości. Graficzną interpretację równania (2) przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Graficzna interpretacja przedziału niepewności
 Fig. 5. Graphical interpretation of the uncertainty interval

Błędy generowane przez poszczególne źródła sumują się na wyjściu systemu. Znajac rozkłady błędów cząstkowych, obliczenie niepewności realizowane jest w dwóch krokach. Najpierw wyznaczany jest rozkład błędu wypadkowego $g(\delta)$, będący splotem wszystkich zbiorów błędów wejściowych, a następnie zgodnie z równaniami (2,3) wyznaczana jest wartość niepewności Δ . Wyznaczenie splotów wielu funkcji jest jednak trudne. W pracy [5] zaproponowano prostszą metodę wyznaczenia niepewności wypadkowej, na podstawie znajomości niepewności cząstkowych oraz współczynników koherencji wyrażających związki zachodzące pomiędzy błędami w czasie ich składania. Zgodnie z zależnościami przedstawionymi w pracy [5], niepewność wypadkową można wyznaczyć według reguł redukcyjnej arytmetyki interwałowej obliczając

$$\Delta_x = \sqrt{\mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}}, \quad (4)$$

gdzie dla analizowanego układu

$$\mathbf{u} = [\mathbf{u}_R \quad \mathbf{u}_S \quad \mathbf{u}_D \quad \mathbf{u}_{DS}]^T \quad (5)$$

jest wektorem składającym się z niepewności cząstkowych, z których każda odnosi się do pojedynczego błędu na wejściu algorytmu, bądź błędu własnego.

Macierz kwadratowa \mathbf{R} nazywana jest macierzą koherencji i wyraża związki zachodzące pomiędzy błędami w procesie ich składania. Współczynniki tej macierzy zależą od kształtu rozkładów błędów i korelacji między nimi [5,6]. Tworzenie macierzy koherencji jest procesem złożonym i zostanie omówione w kolejnych publikacjach.

6. WNIOSKI

W systemach pomiarowo-sterujących może istnieć potrzeba uwzględnienia błędów powodowanych opóźnieniem. W sytuacjach takich konieczna jest znajomość histogramów opóźnień. Znajomość histogramów opóźnień pozwala na wyznaczenie histogramów błędów nimi powodowanych, a to prowadzi do wyznaczenia niepewności związanej z opóźnieniami w systemie. Zastąpienie splotu równaniami macierzowymi umożliwia obliczanie niepewności wyniku pomiaru w czasie pracy systemu pomiarowo-sterującego. Jednak wymaga to stworzenia macierzy koherencji, co jest możliwe, gdy znane są rozkłady poszczególnych źródeł błędów w systemie i korelacje zachodzące między nimi.

Literatura

1. Sacha K. : *QNX - system operacyjny*. WNT, Warszawa 1995.
2. Jakubiec J., Roj J.: *Pomiarowe przetwarzanie próbkujące*. Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2000.
3. *RTOS Evaluation Report Definition*, REAL-TIME Magazine, 1999.
4. Żurkowski R.: *Pomiar czasu reakcji systemu operacyjnego na zdarzenia zewnętrzne*. PAR nr 7-8 2004. s.130-132.
5. Jakubiec J.: *Redukcyjna arytmetyka interwałowa w zastosowaniu do wyznaczania niepewności algorytmów przetwarzania danych pomiarowych*. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
6. Konopka K.: *Wpływ korelacji między błędami na współczynnik koherencji w ocenie niepewności za pomocą redukcyjnej arytmetyki interwałowej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej z.98, Łódź 2001 s. 335-344.

Recenzent: Dr hab. inż. Anna Domańska

Wpłynęło do Redakcji dnia 7 grudnia 2004

Abstract

Measurement data acquired in a measuring-control system, shown in Fig. 1, can be used for determination of the signals which control actuators. Time variation of the system input quantities causes that inaccuracy of the data delivered at the actuator inputs depend not only on properties of measuring instruments but also on delays arising during the data propagation from the input to the output of the system. Equation (1) describe calculation process of error caused by propagation delay of result in the system. Illustration of this error arising presents Fig. 2. Exemplary error histogram is presented on Fig. 3b.

Uncertainty of the results at system outputs may be obtained using the definition (2) Application of reductive interval arithmetic allows calculating the output result uncertainty by using the matrix equation (4). This equation can be interpreted as uncertainty model of the system.