

Jerzy JAKUBIEC

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII I AUTOMATYKI ELEKTROTECHNICZNEJ

System pomiarowo-sterujący jako metrologiczny obiekt badań

Prof. dr hab. inż. Jerzy JAKUBIEC

Zastępca dyrektora ds. naukowych Instytutu Metrologii i Automatyki Elektrycznej Politechniki Śląskiej. Zainteresowania naukowe – analiza propagacji błędów w torach przetwarzania analogowo/cyfrowego, synteza modeli niepewności algorytmów przetwarzania danych pomiarowych, modelowanie metrologicznych właściwości systemów pomiarowo-sterujących. Autor około 100 prac naukowych, 6 monografii i podręczników akademickich.

jakubiec@polsl.gliwice.pl



Streszczenie

Artykuł zawiera charakterystykę badań prowadzonych w Instytucie Metrologii i Automatyki Elektrycznej nad metrologicznymi właściwościami systemów pomiarowo-sterujących. W szczególności badania te doprowadziły do opracowania modeli przydatnych do opisu tego rodzaju właściwości systemów, w tym modelu realizacji zadań pomiarowych przez system, modelu błędu i modelu niepewności systemu. Modele te pozwalają na analizę błędów podstawowych ogniw procesu pomiarowego w systemie, takich jak przetworniki próbkujące i algorytmy przetwarzania programowego, a także błędów powodowanych opóźnieniami w realizacji zadań pomiarowych. Opisano model błędu systemu oraz odpowiadający mu model niepewności, który stanowi podstawę obliczania niepewności wyników wyjściowych systemu.

Abstract

The paper characterizes the research made in Institute of Electrical Measurement and Control Engineering on metrological properties of control-measuring systems. In particular, the investigations carried into development of the models useful for description of the system properties, such as the model of measurement task realization by the system, an error model and an uncertainty model of the system. These models enable error analysis of the basic elements of a measurement process in the system, such as sampling converters and measurement data processing algorithms, as well as analysis of errors caused by delays in measurement task realization. An error model of the system and, adequate to it, an uncertainty model, which is the basis of uncertainty calculation of the results at the system output, has been described.

Słowa kluczowe: system pomiarowo-sterujący, model propagacji błędów, obliczanie niepewności

Key words: measuring-control system, error propagation model, uncertainty calculation

1. Wstęp

System pomiarowo-sterujący można określić jako taki zestaw sprzętu i oprogramowania, który służy do kompleksowej realizacji pomiarów wielkości charakteryzujących obiekt, a uzyskiwane wyniki są używane do sterowania obiektem. Można wyróżnić dwie podstawowe klasy tego rodzaju systemów. Jedną z nich tworzą systemy pomiarowe, których celem działania jest uzyskanie odpowiednio pełnej informacji o obiekcie pomiaru w założonych warunkach. Do drugiej należą systemy automatyzacyjne służące do optymalnego, w sensie odpowiedniego kryterium, sterowania obiektem, którym najczęściej jest proces przemysłowy. Obydwie

klasy mają wiele cech wspólnych. Przede wszystkim ich ogólna struktura, pokazana na rys. 1, jest jednakowa. Stosowane w nich rozwiązania sprzętowe są w dużym zakresie podobne, w szczególności jeśli rozpatruje urządzenia pomiarowe, technologie komputerowe i osprzęt komunikacyjny. Pomiar i propagacja danych pomiarowych w systemie automatyzacyjnym z założenia odbywa się na bieżąco, dzieje się tak również w wielu rozwiązaniach systemów pomiarowych. Można zatem ogólnie rozpatrywać system pomiarowo-sterujący jako tzw. system czasu rzeczywistego, co narzuca widzenie procesu pomiaru w takim systemie zarówno pod kątem jego dokładności, jak i zależności czasowych opisujących propagację wyników [1].

W konkluzji można stwierdzić, że system pomiarowo-sterujący jest reprezentatywnym obiektem do badania zjawisk związanych z propagacją informacji pomiarowej w różnego rodzaju systemach. Specyfika tego rodzaju zjawisk powoduje, że problematyka opisu metrologicznych właściwości systemu musi być rozpatrywana w sposób kompleksowy, to znaczy obejmować zarówno zagadnienia podstawowe związane z modelowaniem procesu pomiaru w systemie, analizą właściwości różnego rodzaju algorytmów przetwarzania programowego, jak i budowaniem całościowych modeli systemu, takich jak model błędów i model niepewności.

2. System eksperymentalny

Dla celów prowadzenia badań zbudowano sieciowy system eksperymentalny składający z komputerów oraz kasy w standardzie VMEbus zarządzany systemem operacyjnym czasu rzeczywistego QNX. Kaseca VME wyposażona jest w karty pomiarowe realizujące wielokanałowe przetwarzanie A/C z próbkowaniem, karty liczników służących do pomiaru czasu oraz moduł sterowania przyrządami pracującymi w standardzie IEC 625.

System wykorzystywany jest do prowadzenia dwójakiego rodzaju badań:

- identyfikacji źródeł błędów w systemie, a w szczególności błędów przetwarzania analogowo/cyfrowego oraz błędów powodowanych opóźnieniami w systemie [2, 3],
- weryfikacji procedur wyznaczania niepewności algorytmów przetwarzania danych oraz niepewności wyników na wyjściach systemu [4].

Procedury pomiarowe są w obu przypadkach podobne. Polegają na zastosowaniu generatora wzorcowych przebiegów poliharmonicznych o zmiennej częstotliwości i dobieganych amplitudach i przesunięciach fazowych poszczególnych harmonicznych. Wartości napięcia wyjściowego generatora są zadawane cyfrowo i przed rozpoczęciem pomiarów mierzone dokładnym woltomierzem. Napięcie z generatora podawane jest na wejście karty pomiarowej, gdzie jest próbkowane, kwantowane, a wyniki porównywane są z wartościami zadawanymi cyfrowo. Różnica stanowi błąd, którego wartości zestawiane są w histogramy reprezentujące wyniki 100 000 eksperymentów każdy.

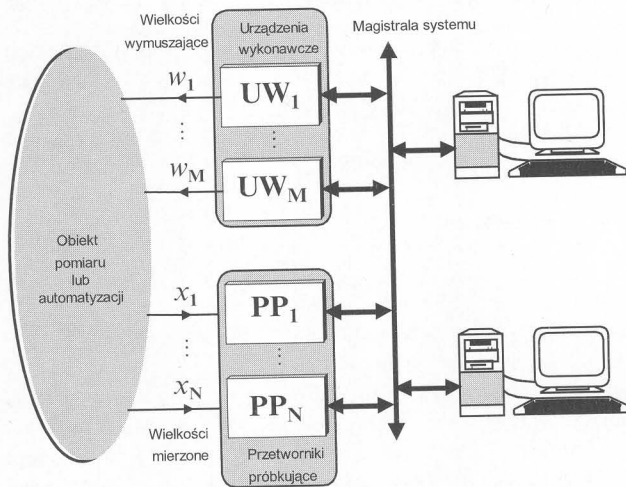
Dla celów identyfikacji błędów karty przetwarzania A/C opracowano metodę [2], której istota polega na swojego rodzaju dekompozycji rozkładu błędu wypadkowego, dzięki czemu możliwe jest określenie funkcji gęstości prawdopodobieństwa wszystkich istotnych źródeł błędu karty, takich jak: błąd kwantowania, błąd liniowości, błędy szumów, dryft zera i temperaturowy, itp. Ponadto wyznacza się model dynamicznych właściwości karty, który pozwala na określenie błędu dynamicznego dla zadanego przebiegu poliharmonicznego wielkości wejściowej.

Wyznaczanie rozkładów błędów powodowanych opóźnieniami poprzedzane jest badaniem przyczyn występowania opóźnień w systemie, które polega na losowym inicjowaniu zdarzeń w systemie w określonych warunkach i mierzeniu czasu reakcji systemu [3]. Wartości opóźnień zestawiane są w histogramy w podobny sposób, jak robi się to w przypadku błędów.

Weryfikacja procedur obliczania niepewności polega na porównywaniu niepewności obliczonej na podstawie modelu niepewności z niepewnością uzyskaną na podstawie definicji dla uzyskanego eksperymentalnie rozkładu błędu wypadkowego wybranej wielkości wyjściowej systemu. Eksperymenty przeprowadza się dla zadane go przebiegu poliharmonicznego wielkości wejściowej mierząc jego wartości chwilowe za pomocą karty o uprzednio zidentyfikowanych błędach i przetwarzając wyniki przy użyciu algorytmu (lub łańcucha algorytmów) o znanych właściwościach i realizowanego w warunkach pracy wielozadaniowej systemu operacyjnego. Tak uzyskiwane wyniki porównuje się z odpowiadającymi wartościami chwilowymi znanego przebiegu wejściowego [4]. Ich różnica stanowi błąd, którego wartości zestawiane są w histogram i stanowią podstawę wyznaczania niepewności na podstawie jej definicji.

3. Model funkcjonalny systemu

Jako punkt wyjścia do budowy modeli opisujących metrologiczne właściwości systemu przyjmuje się strukturę systemu pokazaną na rys. 1. Struktura ta obejmuje trzy rodzaje urządzeń: przetworniki próbkujące, urządzenia wykonawcze i komputery. Urządzenia te komunikują się za pomocą magistrali, która symbolizuje tu media komunikacyjne systemu.



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

Przetworniki próbkujące służą do pomiaru wartości chwilowych zmiennych w czasie wielkości wejściowych systemu $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_n(t)$, charakteryzujących stan obiektu. Wielkości te w przetwornikach próbkujących są poddawane przetwarzaniu analogowemu, próbkowaniu i kwantowaniu, a na koniec programowemu odtwarzaniu [5]. Zmierzone wartości chwilowe przekazywane są za pośrednictwem magistrali do komputerów realizujących różnego rodzaju algorytmy przetwarzania. Wielkości wyjściowe algorytmów, traktowane zarazem jako wielkości wyjściowe systemu, są przekazywane do urządzeń wykonawczych, wytwarzających na ich podstawie wielkości sterujące systemem $w_1(t)$, $w_2(t)$, ..., $w_M(t)$.

Opisana struktura stanowi swojego rodzaju modelowe ujęcie różnego rodzaju konstrukcji systemów pomiarowo-sterujących stosowanych w praktyce. Są spotykane rozwiązania, których struktura daje się wprost opisać w powyższy sposób. Przykładem są systemy budowane w standardzie IEC-625, w których przyrządy pomiarowe

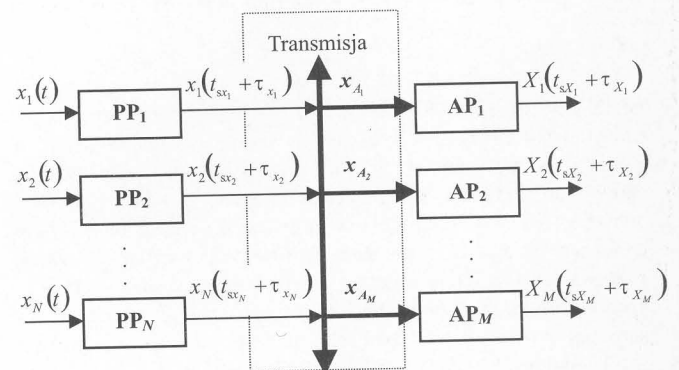
pracują jako przetworniki próbkujące, czyli dostarczające wartości chwilowych mierzonych wielkości. Dla innych rozwiązań, przykładowo systemów modularnych, przedstawione ujęcie może być traktowane jako model funkcjonalny rzeczywistej struktury systemu.

4. System jako dystrybutor zasobów

Opisany model funkcjonalny traktowany jest jako podstawa działań mających na celu uzyskanie takiej struktury systemu, która umożliwiałaby budowanie odpowiednio prostych modeli matematycznych opisujących metrologiczne właściwości systemów pomiarowo-sterujących. Problem budowy tego rodzaju modeli jest w ogólnym przypadku zagadnieniem trudnym, gdyż należy uwzględnić złożoność rzeczywistych warunków funkcjonowania systemów, a w szczególności wziąć pod uwagę, że:

- w systemie występuje wiele wielkości, które ogólnie należy rozpatrywać jako zmieniające się w czasie,
- wielkości wyjściowe systemu (mezurandy) uzyskiwane są na podstawie zbiorów wyników pomiaru wartości chwilowych wielkości wejściowych przy użyciu algorytmów przetwarzania programowego o złożonej strukturze przetwarzania [6],
- w systemie realizowane jest przetwarzanie analogowe, analogowo/cyfrowe i programowe, przy czym przy czym każde z nich może być opisane jako łańcuch przetworników pomiarowych wprowadzających w procesie przetwarzania wiele różnego rodzaju błędów i w specyficzny sposób propagujących błędy z wejścia na wyjście [5],
- w procesie przetwarzania poszczególne wielkości korzystają z zasobów rywalizując o nie między sobą, co jest przyczyną występowania opóźnień zależnych od zdarzeń inicjujących pomiary [3],
- zmienność w czasie wielkości wejściowych powoduje, że opóźnienia są przyczyną powstawania specyficznych błędów zależnych zarówno od szybkości zmian tych wielkości, jak i procedur udostępniających im odpowiednie zasoby systemu.

Wstępne efekty badań mających na celu uzyskanie modeli ma-



Rys.2. Schemat realizacji zadań pomiarowych przez system
Fig.2. Scheme of measurement task realization by the system

tematycznych, opisujących metrologiczne właściwości systemu jako całości, przedstawiono w pracy [7]. Badania te doprowadziły także do uzyskania modelu systemu jako dystrybutora zasobów niezbędnego do realizacji zadań pomiarowych (rys. 2). Model ten całościowo reprezentuje metrologiczne właściwości systemu i zbudowano go w taki sposób, aby zarazem stanowił schemat realizacji zadań pomiarowych przez system.

Na schemacie z rys. 2 zadania podzielono na trzy grupy wykonujące kolejno:

- przetwarzanie próbkujące polegające na pomiarze wartości chwilowych wielkości wejściowych systemu,

- transmisję i gromadzenie wartości chwilowych wielkości wejściowych,
- programowe przetwarzanie zgromadzonych wartości chwilowych.

Taki sposób zgrupowania zadań jest użyteczny przede wszystkim dla celów analizy przepływu informacji pomiarowej w systemie. Początkowymi ogniwami, służącymi do pozyskiwania informacji, są przetworniki próbkujące oznaczone symbolem **PP**. Każdy z nich realizuje pomiar jednej wielkości wejściowej przekazując na swoje wyjście ocenę $x_n(t_{SXn} + \tau_{Xn})$ jej wartości w chwili t_{SXn} z opóźnieniem τ_{Xn} , n jest numerem wielkości $n=1, \dots, N$. Oceny te są rozgłaszane w systemie za pomocą mediów transmisyjnych i trafiają do tych odbiorników, które je wykorzystują do dalszego przetwarzania w sposób programowy przy użyciu algorytmów oznaczonych jako **AP**. Odbiorniki grupują uzyskiwane dane w zbiory opisane jako wektory x_{Am} , m jest numerem algorytmu (łańcucha algorytmów), $m=1, \dots, M$, po czym wyznaczają na ich podstawie odpowiednie oceny $X_m(t_{SXm} + \tau_{Xm})$ wielkości mierzonej (mezurandów) odnoszonych do nominalnych chwil próbkowania t_{SXm} , przy czym moment wyznaczenia oceny jest opóźniony o czas τ_{Xm} .

Schemat z rys. 2 opisuje propagację informacji pomiarowych w systemie zarówno w ujęciu jakościowym – określa rodzaje zadań, jak i czasowym. Może być zatem podstawą przeprowadzenia analizy metrologicznych właściwości poszczególnych rodzajów zadań realizowanych w systemie, w efekcie której uzyskuje się równania przetwarzania, opis źródeł błędów oraz opis opóźnień wprowadzanych przez te zadania.

5. Modele wyników pomiarów wykonywanych w systemie

Podstawą budowy modelu błędów i modelu niepewności systemu jest model wyników pomiarów wykonywanych w systemie. Pomiar bezpośredni w systemie realizowane są na zasadzie kwantowania polegającego na porównywaniu wielkości mierzonej z sumą elementarnych wzorców o jednakowej wartości nazywanych kwantami. Wyniku pomiaru można w takim przypadku opisać jako [8]

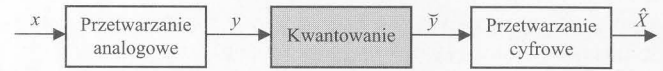
$$y_m = \tilde{y} + \delta_{kw} \quad (1)$$

gdzie y_m jest zmienną losową reprezentującą nieznaną wartość prawdziwą wielkości mierzonej y po wykonaniu kwantowania, jest \tilde{y} wskazaniem kwantyzatora, a δ_{kw} jest losowym błędem kwantowania o rozkładzie jednostajnym w przedziale $[-0,5q, 0,5q]$, q jest wartością kwantu. Należy zwrócić uwagę, że jest to model pojedynczego wyniku pomiaru, gdyż w systemie ze względu na zmienność w czasie wielkości mierzonej nie ma możliwości powtórzenia pomiaru tej samej wartości wielkości. W związku z tym model opisany równaniem (1) musi być znany a priori, czyli przed wykonaniem pomiaru. Wymaga to identyfikacji wszystkich błędów procesu pomiaru polegającej na wyznaczeniu ich rozkładów i współczynników korelacji [2].

Algorytmy przetwarzania stosowane w systemie realizują swoje działania na ciągach danych składających się z wyników pomiaru wartości chwilowych wielkości wejściowych. Obliczanie dokładności wyników na wyjściu tego rodzaju algorytmów wymaga założenia o ergodycznych właściwościach błędów jako wielkości losowych. W takim przypadku błąd wyniku pomiaru w postaci zależności (1) interpretowany jest jako dyskretna realizacja ergodycznego procesu stochastycznego opisywanego jako suma błędów losowych o zerowych wartościach oczekiwanych i symetrycznych rozkładach [8].

W systemie pomiarowo-sterującym pomiar bezpośredni realizowany na zasadzie kwantowania rozdziela dwie różnego rodzaju fazy przetwarzania: analogowego i cyfrowego, jak pokazano to na rys. 3. Przetwarzanie analogowe ma na celu przekształcenie wiel-

kości wejściowej x na taką wielkość y , która może być automatycznie i szybko skwantowana, z reguły jest to napięcie lub prąd elektryczny kwantowane za pomocą przetworników A/C. Wskazania \tilde{y} kwantyzatora są grupowane tworząc zbiory danych cyfrowych, które są następnie przetwarzane programowo przy użyciu odpowiednich algorytmów.



Rys. 3. Schemat procesu przetwarzania w systemie pomiarowo-sterującym
Fig. 3. Scheme of processing in the measuring-control system

Przetwarzanie analogowe łącznie z kwantowaniem może być interpretowane jako pośredni pomiar wielkości wejściowej x , realizowany w dwóch etapach. Najpierw wielkość x jest przetwarzana na wielkość y , która następnie jest mierzona bezpośrednio na zasadzie kwantowania. Dla wielkości mierzonej zmiennych w czasie przetwarzanie analogowe jest realizowane za pomocą łańcucha przetworników, z których pierwszym jest czujnik przetwarzający zmienną w czasie wielkość wejściową $x(t)$ na napięcie. Napięcie to jest wzmacniane a następnie próbkowane w chwili t_k , a pobrana próbka $y(t_k)$ jest kwantowana. Na podstawie modelu kwantowania (1) otrzymuje się probabilistyczny opis tak uzyskiwanego wyniku pomiaru pośredniego wartości chwilowej wielkości wejściowej $x(t)$ w postaci równania

$$x_m(t_k) = \frac{1}{S k_{wz}} [\tilde{y}(t_k) + \delta_{kw}(t_k) + \delta_y(t_k)] \quad (2)$$

gdzie S jest czułością czujnika k_{wz} , jest współczynnikiem wzmocnienia wzmacniacza, δ_{kw} błędem wypadkowym na wyjściu toru analogowego, a wypadkowym błędem kwantowania.

Przetworniki realizujące opisane powyżej działania nazywane są próbkującymi [5]. Zgodnie z równaniem (2), ocenę wartości chwilowej wielkości mierzonej za jego pomocą, opisuje równanie

$$x(t_k) = E[x_m(t_k)] = \frac{\tilde{y}(t_k)}{S k_{wz}} \quad (3)$$

a równanie błędów tej oceny ma postać

$$\delta_x(t_k) = \frac{1}{S k_{wz}} [\delta_{kw}(t_k) + \delta_y(t_k)] \quad (4)$$

Biorąc pod uwagę, że zgodnie z opisaną strukturą systemu przetworniki próbkujące są w nim źródłami danych pomiarowych, równania (3) i (4) mogą stanowić podstawę budowy modeli obejmujących całościowo właściwości metrologiczne systemu.

Zgodnie z rys. 3, drugi przypadek pomiaru pośredniego w systemie zachodzi, gdy wyniki pomiaru wielkości mierzonej bezpośrednio są przetwarzane w sposób programowy. Załóżmy, że wielkość X mierzona pośrednio jest ciągłą i monotoniczną funkcją n wielkości y_1, y_2, \dots, y_n mierzonych bezpośrednio, a wynik pomiaru każdej z tych wielkości jest sumą wskazania i błędów, a zatem $y_1 = \tilde{y}_1 + \delta_1, y_2 = \tilde{y}_2 + \delta_2, \dots, y_n = \tilde{y}_n + \delta_n$. Zbiór wskazań określa punkt, wokół którego funkcja jest rozwijana w szereg. Przyjmując, że wartości błędów poszczególnych pomiarów są odpowiednio małe, można pozostawić tylko początkowe wyrazy rozwinięcia, w związku z czym uzyskuje się zależność

$$X = f(\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_n) + \frac{\partial f}{\partial y_1} \delta_1 + \frac{\partial f}{\partial y_2} \delta_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial y_n} \delta_n + \delta_f \quad (5)$$

gdzie δ_f oznacza błąd spowodowany pominięciem wyrazów niezerowych. Działania na wskazaniach dają w wyniku ocenę wielkości mierzonej pośrednio $X = f(\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_n)$. Oznaczając pochodne symbolami a_1, a_2, \dots, a_n , otrzymuje się wyrażenie

$$X_m = X + a_1 \delta_1 + a_2 \delta_2 + \dots + a_n \delta_n + \delta_f \quad (6)$$

będące modelem wyniku pomiaru pośredniego w sytuacji, gdy wynik ten uzyskiwany jest na podstawie określonej funkcji (algorytmu przetwarzania) wiążącej go z wieloma różnymi wielkościami mierzonymi bezpośrednio. Model ten obowiązuje w punkcie funkcji określonym przez wskazania kwantyzatorów realizujących pomiar bezpośredni.

Gdy funkcja jest liniowa i realizowana na wartościach chwilowych tej samej wielkości $y(t)$ mierzonej bezpośrednio, czyli czasowych ciągach danych, algorytm przetwarzania ma postać

$$X(n) = a_0 y(k) + a_1 y(k+1) + \dots + a_{K-1} y(k+K-1) \quad (7)$$

gdzie k jest numerem chwili próbkowania wielkości, $k = 0, 1, \dots, K-1$, n oznacza moment dla którego wyznaczana jest wartość wielkości X mierzonej pośrednio. Wprowadzając do równania (7) zależności opisujące wyniki pomiaru wartości chwilowych, otrzymuje się model pojedynczego wyniku przetwarzania na wyjściu algorytmu liniowego jako

$$X_m(n) = a_0 [\bar{y}(k) + \delta_{KW}(k)] + a_1 [\bar{y}(k+1) + \delta_{KW}(k+1)] + \dots + a_{K-1} [\bar{y}(k+K-1) + \delta_{KW}(k+K-1)] \quad (8)$$

gdzie $\delta_{KW}(k)$, $\delta_{KW}(k+1)$, ..., $\delta_{KW}(k+K-1)$ są realizacjami tego samego ergodycznego procesu losowego opisującego wypadkowy błąd kwantowania. Równanie (8) można zapisać w postaci macierzowej

$$X_m(n) = \mathbf{a}^T \bar{\mathbf{y}} + \delta_x \quad (9)$$

gdzie \mathbf{a} jest wektorem współczynników algorytmu i $\mathbf{a}^T = [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_{K-1}]$, T oznacza transpozycję, $\bar{\mathbf{y}}$ jest wektorem wskazań, przy czym $\bar{\mathbf{y}}^T = [\bar{y}(k) \ \bar{y}(k+1) \ \dots \ \bar{y}(k+K-1)]$. Błąd wyniku wyjściowego w zapisie macierzowym przyjmuje postać

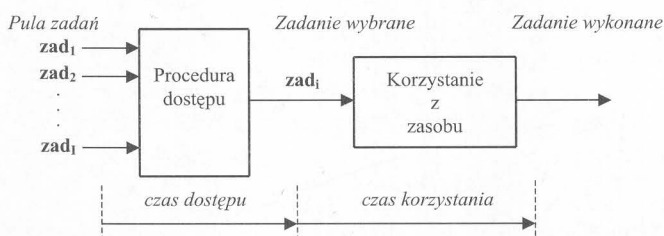
$$\delta_x = \mathbf{a}^T \mathbf{e} \quad (10)$$

gdzie $\mathbf{e}^T = [\delta_{KW}(k) \ \delta_{KW}(k+1) \ \dots \ \delta_{KW}(k+K-1)]$

Algorytm w postaci równania (7) można nazywać „jednopunktowym”, gdyż jedna jego realizacja dostarcza jednego wyniku wyjściowego. Algorytmy złożone dostarczające ciągów wyników można traktować jako zbiory algorytmów jednopunktowych, stąd ogólna analiza metrologicznych właściwości obu rodzajów algorytmów może być prowadzona przy użyciu zależności (7) [9].

6. Błąd powodowany opóźnieniami w systemie

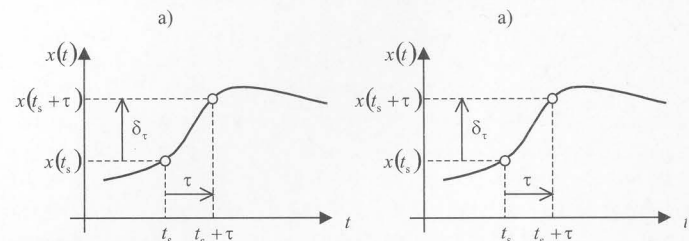
Realizacja zadań pomiarowych, zgodnie ze schematem z rys. 2, wymaga korzystania z zasobów systemu, takich jak: tory przetwarzania A/C, media transmisyjne i procesory. Odbywa się to z reguły w rywalizacji z innymi zadaniami, w sposób pokazany na rys. 4.



Rys.4. Ogólny schemat wykorzystywania zasobów systemu przez zadania
Fig.4. General scheme of usage of the system resources by tasks

Każde zadanie wykonywane jest w dwóch fazach. Najpierw uzyskiwany jest dostęp do zasobu w rywalizacji z innymi zadaniami, po czym w drugiej fazie zadanie wykorzystuje zasób do swoich celów.

Realizacja każdej z faz wymaga czasu, odpowiednio nazywanego czasem dostępu i czasem korzystania z zasobu. Czasy te stanowią składowe opóźnienia zadania. Pierwsza składowa ma zmienną wartość zależną od rodzaju procedury dostępu, sposobu inicjacji zadań z określonej puli oraz czasów ich realizacji i może być opisana funkcją zależną od momentów inicjacji zadań. Druga składowa opóźnienia ma stałą wartość równą czasowi realizacji zadania.



Rys.5. a) Ilustracja powstawania błędu δ_c spowodowanego opóźnieniem propagacji wyniku w systemie pomiarowo-sterującym t_s , jest momentem próbkowania wielkości wejściowej, τ jest opóźnieniem, b) przykładowy rozkład błędu spowodowanego opóźnieniem dla sinusoidalnie zmiennej wielkości wejściowej o pulsacji ω , w przypadku gdy opóźnienie spowodowane jest rywalizacją dwóch zadań o czasach realizacji ϑ_1 i ϑ_2

Fig.5. a) Illustration of the error δ_c arising caused by delay of result propagation in the measuring-control system t_s , is sampling moment of input quantity, τ is a delay, b) exemplary distribution of the error caused by delay for sinusoidal changes of the input quantity with frequency ω in the case when the delay is caused by competition of two tasks with realization times ϑ_1 and ϑ_2

Zagadnienia analizy opóźnień w systemach rozpatrywane są z różnych punktów widzenia [10, 11, 12]. W pracy [3] zastosowano opis losowy opóźnień, gdyż błędy powodowane przez nie kumulują się z innymi błędami w systemie wpływając na dokładność danych wyjściowych. Rys. 5a ilustruje powstawanie błędów powodowanego opóźnieniem, a na rys. 5b pokazano funkcje gęstości prawdopodobieństwa tego błędu dla sinusoidalnie zmiennej wielkości wejściowej w przypadku, gdy o zasób rywalizują dwa zadania – jedno z nich jest inicjowane okresowo, a drugie losowo zgodnie z rozkładem jednostajnym.

7. Model błędu systemu

Model błędu systemu stanowi zbiór równań opisujących błędy pojedynczych wyników na wszystkich wyjściach systemu. Na podstawie rys. 2 system pomiarowo-sterujący może być traktowany jako zbiór algorytmów przetwarzania (lub ich łańcuchów), na wejścia których przekazywane są wyniki pomiaru uzyskiwane za pomocą przetworników próbkujących. Zatem model błędów stanowią równania opisujące błędy wyników na wyjściach algorytmów będących końcowymi ogniwami przetwarzania w systemie, zależnie od błędów wyników wejściowych i błędów własnych algorytmów.

Właściwości algorytmów przetwarzania ciągów czasowych powodują, że błędy ich danych wejściowych należy podzielić na trzy grupy w zależności od sposobu, w jaki algorytm przetwarza te błędy [9]. I tak, błędy nazywane są statycznymi, jeżeli ich wartości praktycznie nie zmieniają się w trakcie realizacji algorytmu. Błędy dynamiczne i losowe zmieniają wartości, przy czym dla tych pierwszych znane są związki między ich kolejnymi wartościami. Natomiast zmienność wartości błędów losowych określona jest regułami probabilistycznymi. Gdy rozpatruje się wielokrotną realizację algorytmu błędy wypadkowe wszystkich trzech rodzajów opisywane są probabilistycznie.

Zgodnie z ogólnym równaniem błędów algorytmu (10) oraz przy uwzględnieniu opisanego podziału błędów ogólny model błędów algorytmu można zapisać jako

$$\delta_x = \mathbf{a}^T [\mathbf{e}_s + \mathbf{e}_D + \mathbf{e}_R] + \delta_{SA} + \delta_{DA} + \delta_{RA} + \delta_c \quad (11)$$

gdzie e_s, e_D, e_R są wektorami składającymi się z błędów obarczających kolejne wyniki w ciągu danych wejściowych odpowiednio o charakterze statycznym, dynamicznym i losowym, $\delta_{SA}, \delta_{DA}, \delta_{RA}$ są odpowiednimi błędami własnymi algorytmu, natomiast δ_c jest błędem powodowanym przez opóźnienia zależnym od sumy opóźnień cząstkowych o mechanizmie powstawania opisanym w punkcie 6. Zatem model błędu systemu można zapisać w postaci zespolu równań

$$\begin{aligned} \delta_{X_1} &= \mathbf{a}_1^T [\mathbf{e}_{S1} + \mathbf{e}_{D1} + \mathbf{e}_{R1}] + \delta_{SA1} + \delta_{DA1} + \delta_{RA1} + \delta_{c1}, \\ \delta_{X_2} &= \mathbf{a}_2^T [\mathbf{e}_{S2} + \mathbf{e}_{D2} + \mathbf{e}_{R2}] + \delta_{SA2} + \delta_{DA2} + \delta_{RA2} + \delta_{c2}, \\ &\vdots \\ \delta_{X_M} &= \mathbf{a}_M^T [\mathbf{e}_{SM} + \mathbf{e}_{DM} + \mathbf{e}_{RM}] + \delta_{SAM} + \delta_{DAM} + \delta_{RAM} + \delta_{cM}, \end{aligned} \quad (12)$$

gdzie symbolem X_1, X_2, \dots, X_M są wielkościami wyjściowymi systemu, M jest liczbą tych wielkości. Model ten może być wykorzystywany w dwojakiego rodzaju sytuacjach. Można go użyć do analizy błędów poszczególnych wielkości wyjściowych systemu, w tym do badań wpływu poszczególnych źródeł błędów na błąd wypadkowy oraz propagacji błędów z wejścia na wyjście różnego rodzaju algorytmów. Istotną właściwością modelu jest jego przydatność do budowy modelu niepewności systemu, który umożliwi obliczanie niepewności wyników na jego wyjściach.

8. Model niepewności systemu

Dla zmiennej w czasie wielkości wejściowej nie jest możliwe powtórzenie pomiaru jej wartości chwilowej, a zatem do obliczania niepewności wyników pomiaru w systemie nie można stosować podejścia proponowanego w przewodniku [13], które zakłada powtarzalność realizacji eksperymentu pomiarowego w tych samych warunkach. Możliwe jest jednak użycie podanej tam ogólnej definicji, zgodnie z którą niepewność określana jest jako „parametr, związany z wynikiem pomiaru, charakteryzujący rozrzut wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej”. Gdy definicję tą stosuje się do modelu wyniku pomiaru w postaci równania (1) [8], uzyskuje się formalny opis niepewności jako takiego parametru Δ , dla którego prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji, w której odległość $|y - \bar{y}| \leq \Delta$ jest równe przyjętemu poziomowi ufności α . Różnica $y - \bar{y}$ stanowi błąd pomiaru δ opisany funkcją gęstości prawdopodobieństwa $g(\delta)$. W takim razie do wyznaczenia niepewności Δ można użyć funkcjonu

$$\int_{-\Delta}^{+\Delta} g(\delta) d\delta = \alpha \quad (13)$$

przy założeniu, że $g(\delta)$ jest dodatnia, symetryczna względem osi rzędnych i całkowna w sensie Riemanna.

W złożonych warunkach pracy systemu, gdzie występuje wiele źródeł błędów o różnorodnych właściwościach, a wyniki pomiaru nimi obciążone przetwarzane są przez rozbudowane algorytmy, obliczanie niepewności jest zagadnieniem trudnym numerycznie. W celu ułatwienia tych obliczeń zbudowano aparat matematyczny nazwany redukcijną arytmetyką interwałową [9, 14], opartą na macierzowym zapisie parametrów rozkładów błędów. Parametry te zależą kształtu rozkładów i współczynników korelacji błędów i tworzą tzw. macierz \mathbf{R} współczynników koherencji. Na podstawie modelu błędów systemu (12) tworzy się wektor obejmujący wszystkie błędy wielkości wyjściowej, po czym dla każdego błędów cząstkowego wyznacza się niepewność zgodnie z funkcjonem (13) i zestawia w wektor niepewności \mathbf{D} . Następnie tworzy się macierz koherencji \mathbf{R} oraz macierz kwadratową grupującą na przekątnej głównej wartości bezwzględne współczynników odpowiedniego równania błędów. Niepewność wypadkową oblicza się zgodnie z równaniem macierzowym

$$\Delta = \sqrt{\mathbf{D}^T \mathbf{A}^T \mathbf{R} \mathbf{A} \mathbf{D}} \quad (14)$$

Model niepewności systemu stanowi zbiór równań określających niepewności wyników na wszystkich wyjściach systemu

$$\begin{aligned} \Delta_{X_1} &= \sqrt{\mathbf{D}_1^T \mathbf{A}_{tr1}^T \mathbf{R}_1 \mathbf{A}_{tr1} \mathbf{D}_1}, \\ \Delta_{X_2} &= \sqrt{\mathbf{D}_2^T \mathbf{A}_{tr2}^T \mathbf{R}_2 \mathbf{A}_{tr2} \mathbf{D}_2}, \\ &\vdots \\ \Delta_{X_M} &= \sqrt{\mathbf{D}_M^T \mathbf{A}_{trM}^T \mathbf{R}_M \mathbf{A}_{trM} \mathbf{D}_M}, \end{aligned} \quad (15)$$

będący swojego rodzaju odwzorowaniem modelu błędów systemu (12).

8. Uwagi końcowe

Przedstawiona koncepcja budowania modeli opisujących metrologiczne właściwości systemów pomiarowo-sterujących podawana jest różnego rodzaju działaniom weryfikacyjnym, które mają przede wszystkim na celu sprawdzenie przydatności procedur obliczania niepewności w praktyce pomiarowej. Podstawowe pytanie dotyczy dokładności tak uzyskiwanych wyników obliczania niepewności dla określonych warunków identyfikacji błędów przetworników próbkujących oraz dokonywanych uproszczeń. Przewiduje się, że końcowym etapem badań będzie opracowanie metodyki postępowania mającej na celu obliczanie niepewności systemów w praktyce.

Literatura

- [1] Bogacz R., Jakubiec J., Al Raimi H., Roj J.: *System do badań własności metrologicznych różnych rozwiązań sprzętowych i programowych systemów pomiarowych*. Mat. Konferencji „Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i w Przemysle” SP’96, Zielona Góra 1996, ss. 7-14
- [2] Jakubiec J., Konopka K.: *Wyznaczanie rozkładów błędów toru przetwarzania analogowo-cyfrowego*. Podstawowe Problemy Metrologii. Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach. Seria: Konferencje Nr. Gliwice-Ustroń, 11-14.05.2003, ss. 383-394.
- [3] Al Raimi H.: *Badanie błędów związanych z opóźnieniami w transmisji danych w systemach pomiarowych*. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 2003
- [4] Żurkowski R.: *Pomiarowa weryfikacja modelu niepewności łańcucha algorytmów*. Materiały XIII Sympozjum „Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych” MiSSP’2003, Kraków 09.2003, Wydawnictwo Zakładu Metrologii AGH, Kraków 2003, ss. 19-26
- [5] Jakubiec J., Roj J.: *Pomiarowe przetwarzanie próbkujące*. Podręcznik akademicki. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000
- [6] Jakubiec J., Konopka K., Topór-Kamiński T.: *Analiza dokładności algorytmów przetwarzania ciągów danych pomiarowych*. Materiały VII Sympozjum „Modelowanie i symulacja systemów pomiarowych” MiSSP’97. Wyd. Zakładu Metrologii AGH, Kraków 1997, ss. 67-74
- [7] Jakubiec J.: *Wyznaczanie niepewności danych w systemie pomiarowym z wykorzystaniem redukcyjnej arytmetyki interwałowej*. Pomiar Automatyka Kontrola, nr 7/8-2002, ss. 5-12. IV Konferencja „Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i w Przemysle” SP’2002 w Zielonej Górze 13-15.06.2002
- [8] Jakubiec J.: *Błędy i niepewność wyniku kwantowania*. Podstawowe Problemy Metrologii. Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach. Seria: Konferencje Nr. Gliwice-Ustroń, 11-14.05.2003, ss. 369-382
- [9] Jakubiec J.: *Redukcyjna arytmetyka interwałowa w zastosowaniu do wyznaczania niepewności algorytmów przetwarzania danych pomiarowych*. Monografia. Wydawnictwo Pol. Śl., Gliwice 2002
- [10] Michta E.: *Modele komunikacyjne sieciowego systemu pomiarowo-sterującego*. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Zielonogórskiej, Zielona Góra 2000
- [11] Kwiecień A.: *Analiza przepływu informacji w komputerowych sieciach przemysłowych*. Monografia. Studia Informatica, Vol. 23, Number 1 (47), Gliwice 2002
- [12] Winiecki W.: *Wirtualne przyrządy pomiarowe*. Monografia. Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003
- [13] *Wyrażanie niepewności pomiaru*. Przewodnik. GUM, 1999
- [14] Jakubiec J.: *Reductive Interval Arithmetic Application to Uncertainty Calculation of Measurement Result Burdened Correlated Errors*. Metrology and Measurement Systems. Quarterly. Vol. X, Number 2 (2003), pp. 137-156

Title: Measuring-control system as a metrological object of investigations

Artykuł recenzowany