

Jerzy JAKUBIEC

Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej

Politechnika Śląska

O PEWNYCH KIERUNKACH ROZWOJU PROGRAMOWANYCH PRZETWORNIKÓW POMIAROWYCH

Streszczenie. W artykule scharakteryzowano wybrane zagadnienia związane z rozwojem programowanych przetworników pomiarowych. Opisano ogólnie problematykę przetwarzania programowego w odniesieniu do realizacji zadań w systemie programowanym. Omówiono ogólną strukturę algorytmów przetwarzania, charakteryzując podstawowe ich rodzaje. Rozpatrzono właściwości algorytmów odtwarzania w zastosowaniu do budowy procedur przetwarzania w czujniku próbkującym. Scharakteryzowano metodę modelowania przetwarzania stosowaną do uzyskiwania szybkich algorytmów do pracy na bieżąco. Podstawą metody są modele odcinkowo-liniowe opisujące cząstkowe właściwości, uzyskane po głębokiej dekompozycji struktury przetwarzania. Opisano zastosowanie tych modeli do uzyskiwania równań propagacji niepewności, co pozwala na analityczne wyznaczanie niepewności wyniku końcowego w złożonych warunkach przetwarzania.

ON SOME WAYS OF PROGRAMMED TRANSDUCER DEVELOPMENT

Summary. The paper presents some aspects of programmed transducer development basing on properties of an instrument called a sampling sensor. Specific problems of the sampling sensor application in programmed measuring and automation systems and general structures of the algorithms used to process data in these systems have been characterized. Data processing is inseparably connected with the error propagation from the input of the algorithm to its output. The way of propagation can be described by the error model while the influence of the errors on the output data accuracy can be evaluated as the algorithm uncertainty. A method of building the error and uncertainty models of the sampling sensor has been presented in the paper. The method enables to evaluate the output uncertainty analitically on the base of the partial static, dynamic and random uncertainties of the algorithm input data.

1. WSTĘP

Dostępność różnorodnych i tanich mikroprocesorów i mikrokontrolerów spowodowała powszechne ich stosowanie w urządzeniach pomiarowych. Zatem sam fakt użycia mikroprocesora nie stanowi współcześnie istotnego wyróżnika przyrządu. Natomiast ważnym czynnikiem jest jego wykorzystanie do realizacji przetwarzania programowego. Powoduje to, że mikroprocesor, a właściwie realizowany przez niego odpowiedni algorytm staje się ogniwem toru pomiarowego. Konsekwencją tego faktu jest konieczność traktowania algorytmu przetwarzania tak samo jak przetwornika pomiarowego. Oznacza to, że nieodłącznym składnikiem liczby uzyskiwanej na wyjściu algorytmu jest ocena jej niepewności.

Zgodnie z powyższym przetwornik pomiarowy nazywany jest przetwornikiem programowanym, jeżeli jakąś część przetwarzania realizuje w sposób programowy, tzn. wykonując program zawarty w pamięci operacyjnej procesora. Programowa realizacja zadań i ich cyfrowy (dyskretny) charakter powodują, że przetworniki programowane należy wyodrębnić jako specyficzną grupę przetworników pomiarowych. Jednym z celów artykułu jest pokazanie tej odrębności oraz jej wpływu na kierunki badań prowadzonych nad przetwornikami programowanymi.

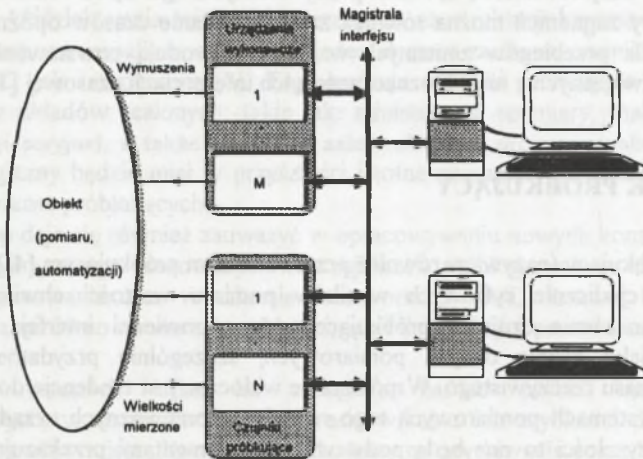
We współczesnej technice pomiarowej można wskazać wiele sytuacji, w których występuje przetwarzanie programowe. Ma ono miejsce zarówno w odrębnych konstrukcyjnie przyrządach pomiarowych, których podstawą działania jest tego rodzaju przetwarzanie, jak i w układach będących fragmentami większej całości. I tak, jako reprezentatywne aplikacje przetwarzania programowego można wskazać czujniki próbkujące [12], przyrządy wirtualne [27], a także pakiety przetwarzania ciągów danych pomiarowych, będące na wyposażeniu wielu różnorodnych programów komputerowych. Mimo występowania często podstawowych różnic w założeniach budowy algorytmów przetwarzania we wszystkich tych przypadkach zauważa się istotne podobieństwa. Najważniejsze z nich dotyczą zagadnień analizy metrologicznej.

Celem artykułu jest zarysowanie obszaru tematycznego dotyczącego tematyki związanej zarówno ze sprzętowymi, jak i programowymi aspektami budowy i analizy właściwości programowanych przetworników pomiarowych. Szczególny akcent położono na zagadnienia dotyczące czujników próbkujących z uwypukleniem problematyki oceny niepewności danych uzyskiwanych na wyjściu tego rodzaju przyrządów. Sposób prezentacji ma na celu wskazanie podstawowych kierunków rozwoju przetworników programowanych, a w szczególności naszkicowanie kierunków badań prowadzonych w Instytucie Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej Politechniki Śląskiej.

2. SYSTEMY PROGRAMOWANE

Przetworniki programowane mogą przybierać różnorodne formy konstrukcyjne mające zastosowanie jako elementy wielu różnych urządzeń pomiarowych. Jednym z najszybciej rozwijających się zastosowań takich przetworników są systemy programowane czasu rzeczywistego (do pracy na bieżąco). Można wskazać dwa główne rodzaje takich systemów:

automatyzacyjne i pomiarowe. Ogólna struktura wymienionych dwu rodzajów systemów pokazana na rys. 1 jest praktycznie taka sama. Różnice wynikają ze stawianych im zadań. I tak system automatyzacyjny ma na celu sterowanie obiektem lub procesem przemysłowym, a działanie systemu pomiarowego podporządkowane jest realizacji zadań pomiarowych.



Rys. 1. Ogólna struktura systemu programowanego
Fig. 1. General structure of the programmed system

W systemach pracujących na bieżąco dane pomiarowe muszą docierać do urządzeń wykonawczych z opóźnieniem nie większym niż wynosi pewna dopuszczalna wartość zależna od procedury sterowania i szybkości zmian wielkości charakteryzujących obiekt. Źródłem danych w takich systemach współcześnie coraz częściej są czujniki próbkujące dostarczające z określoną częstotliwością wyniki pomiaru wartości chwilowych wielkości mierzonych. Wyniki te przekazywane są w postaci komunikatów na magistralę interfejsu systemu, skąd mogą być pobierane przez dowolne urządzenie. Szczególnymi rozwiązaniami systemu programowanego są systemy rozproszone [18], które cechuje przestrzenne rozłożenie obiektu, co w przypadku ich pracy na bieżąco narzuca szczególne wymagania dla interfejsu.

Rozwój systemów programowanych odbywa się w dwóch głównych kierunkach związanych ze sprzętem i oprogramowaniem. Zagadnienia sprzętowe dotyczą głównie:

- Konstrukcji urządzeń programowanych, a w szczególności czujników próbkujących. Można tu wskazać opracowywanie nowych rozwiązań czujników, torów przetwarzania analogowego (tzw. układów kondycjonowania sygnałów), doskonalenie rozwiązań przetworników analogowo-cyfrowych, a także opracowywanie nowych konstrukcji mikroprocesorów i mikrokontrolerów.
- Opracowywania nowych rozwiązań interfejsów i ich aplikacji.

Zagadnienia związane z rozwojem oprogramowania można zestawić w kilku grupach. Można do nich zaliczyć:

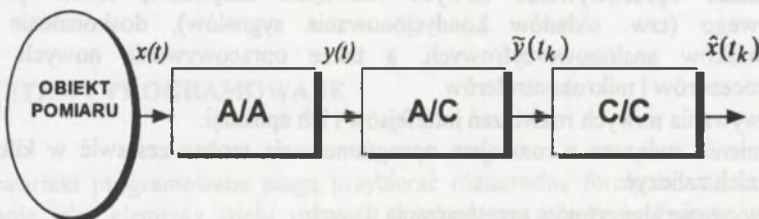
- Opracowywanie algorytmów przetwarzania danych.
- Opracowywanie systemów operacyjnych. W tej grupie należy wyróżnić sieciowe systemy operacyjne czasu rzeczywistego, wśród których najbardziej ekspansywny jest QNX [24], stający się pewnego rodzaju standardem w tej dziedzinie.

Szczególne grupy zagadnień związane są z analizą metrologiczną. Dotyczy to przede wszystkim oceny dokładności źródeł danych pomiarowych w systemie, jakimi są czujniki próbkujące. Należy tu także wskazać zagadnienia dotyczące systemów traktowanych jako całość. Badane są problemy dotyczące optymalizacji systemów [7] ze względu na właściwości metrologiczne. Podejmowane są również próby analitycznego opisu właściwości systemów [6]. Do tej grupy zagadnień można również zaliczyć badanie czasów opóźnień w transmisji danych, które dla przebiegów zmiennych w czasie powodują powstawanie w odbiorniku błędów danych związanych z niejednoznacznością ich interpretacji czasowej [16].

3. CZUJNIK PRÓBKUJĄCY

Czujnik próbkujący (nazywany również przetwornikiem próbkującym [4]) jest przyrządem dostarczającym cyklicznie cyfrowych wyników pomiaru wartości chwilowych wielkości mierzonej. Wyposażenie czujnika próbkującego w odpowiedni interfejs umożliwia jego wykorzystanie jako źródła danych pomiarowych, szczególnie przydatnego w systemie rozproszonym czasie rzeczywistym. Współcześnie widoczna jest tendencja do coraz szerszego stosowania w systemach pomiarowych tego rodzaju autonomicznych urządzeń [4] i można sądzić, że w przyszłości to one będą podstawowymi elementami przekazującymi informacje pomiarowe z obiektu do systemu. Biorąc ponadto pod uwagę, że w wielu urządzeniach pomiarowych można wyodrębnić struktury realizujące działanie czujnika próbkującego, to może być on traktowany jako układ pomiarowy reprezentatywny dla szerokiej klasy przyrządów programowanych. Wychodząc z tego założenia wiele zagadnień dotyczących ogólnie przetworników programowanych zostało tutaj przedstawionych w zastosowaniu do czujnika próbkującego.

W czujniku próbkującym można wyróżnić trzy główne ogniwa przetwarzania przedstawione na rys.2. Zmienna w czasie wielkość mierzona $x(t)$ przetwarzana jest na napięcie $y(t)$ przez tor przetwarzania analogowego oznaczony ogólnie symbolem A/A. Wartości chwilowe napięcia $y(t)$ są mierzone za pomocą przetwornika A/C, na którego wyjściu pojawiają się cyklicznie wyniki cyfrowe $\tilde{y}(t_k)$, k jest numerem chwili próbkowania i $k = 0, 1, \dots$. Wyniki te są następnie przetwarzane programowo przez mikroprocesor w taki sposób, aby dane wyjściowe stanowiły oceny $\hat{x}(t_k)$ wartości chwilowych wielkości mierzonej $x(t_k)$. Dane te odpowiednio zakodowane i zestawione w komunikat wysyłane są do innych urządzeń za pomocą interfejsu.



Rys.2. Ogólna struktura czujnika próbkującego
Fig.2. General structure of the sampling sensor

Rozwój czujników próbkujących dokonuje się w szerokim zakresie. Przede wszystkim można zauważyć szybkie postępy rozwoju konstrukcji tego rodzaju układów pomiarowych. Pojawia się wiele nowych rozwiązań czujników analogowych, w których zasadę działania stanowią zarówno znane zjawiska wykorzystywane przy użyciu nowych technologii, jak i nowe, szczególnie o charakterze fizykochemicznym i biologicznym. Szczególne znaczenie ma tu wykorzystanie oddziaływania wielkości mierzonych na struktury krzemowe (lub ogólnie półprzewodnikowe), co umożliwia scalanie w jeden element zarówno czujnika analogowego, przetwornika A/C, jak i procesora [8]. Tego rodzaju czujniki próbkujące mają wszystkie pozytywne cechy układów scalonych, takie jak: miniaturowe rozmiary, mały pobór mocy, łatwość produkcji seryjnej, a także wszystkie zalety układów programowalnych. Ich dalszy rozwój technologiczny będzie miał w przyszłości istotne znaczenie dla rozszerzania obszaru zastosowań czujników próbkujących.

Szybki postęp daje się również zauważyć w opracowywaniu nowych konstrukcji układów przetwarzania analogowego stosowanych w czujnikach próbkujących w charakterze tzw. układów kondycjonowania oraz w zakresie przetworników A/C. Rozwój badań nad tymi układami pozwala zarówno na wzrost szybkości, jak i dokładności przetwarzania analogowo-cyfrowego.

W okresie ostatnich kilku lat następuje bardzo szybki rozwój układów mikroprocesorowych, w szczególności w zakresie wzrostu ich szybkości działania i mocy obliczeniowej. Rozwój ten jest głównie ukierunkowany na uzyskiwanie coraz lepszego sprzętu komputerowego, lecz niejako przy okazji dostarcza elementów wykonujących efektywniej zadania programowe w czujniku próbkującym. Z obserwacji autora, potwierdzonych m.in. przez rezultat pracy [23], wynika jednak, że potencjalne możliwości popularnych współcześnie podstawowych rozwiązań mikroprocesorów i mikrokontrolerów znacznie przewyższają zapotrzebowanie ze strony oprogramowania czujników próbkujących. Postępy w aplikacjach algorytmów przetwarzania danych w czujnikach próbkujących pozostają dość daleko w tyle za możliwościami stwarzanymi przez sprzęt mikroprocesorowy.

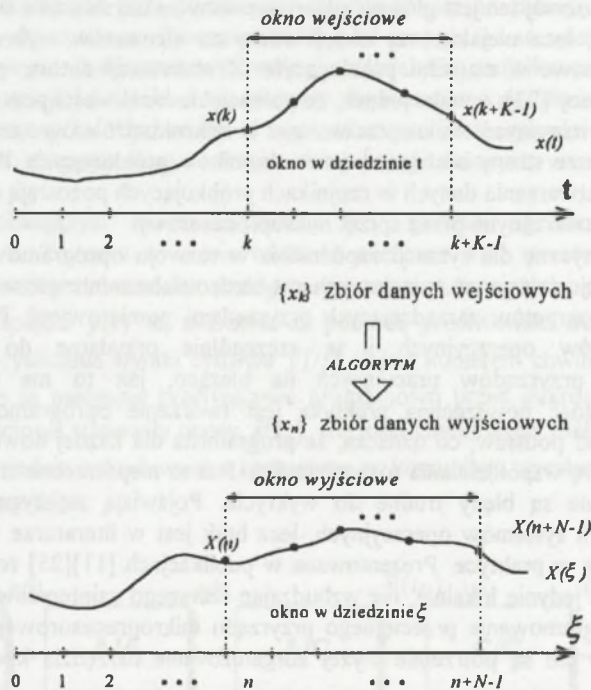
Charakterystyczne dla sytuacji zapóźnienia w rozwoju oprogramowania w stosunku do szybkiego rozwoju rozwiązań sprzętowych jest bardzo słabe zainteresowanie opracowywaniem i aplikacjami programów zarządzających przyrządami pomiarowymi. Programy te spełniają funkcje systemów operacyjnych i są szczególnie przydatne do koordynacji zadań programowych przyrządów pracujących na bieżąco, jak to ma miejsce w czujniku próbkującym. Dość powszechną praktyką jest tworzenie oprogramowania przyrządu za każdym razem od podstaw, co oznacza, że programista dla każdej nowej konstrukcji określa doraźnie strukturę współdziałania różnych zadań. Jest to niepotrzebna strata czasu, a zarazem często popełniane są błędy trudne do wykrycia. Pojawiają się sygnały o rozwiązaniach firmowych takich systemów operacyjnych, lecz brak jest w literaturze wzmianek o tym, jak sprawują się one w praktyce. Prezentowane w publikacjach [11][25] rozwiązania wydają się być użytkowane jedynie lokalnie, nie wzbudzając szerszego zainteresowania. Dowodzi to, że złożoność oprogramowania przeciętnego przyrządu mikroprocesorowego jest tak niewielka, że programiście nie są potrzebne wyżej zorganizowane narzędzia koordynacji programów użytkowych.

Dynamicznie rozwija się natomiast dziedzina obejmująca opracowywanie algorytmów przetwarzania programowego. Algorytmy te można podzielić na dwie główne grupy: algorytmy wsadowe, służące do przetwarzania całościowego uprzednio zarejestrowanego zbioru danych pomiarowych [25] oraz algorytmy do pracy na bieżąco [9] (w czasie

rzeczywistym), realizowane w takt nadchodzących kolejnych danych. W czujnikach próbkujących stosowane są praktycznie wyłącznie algorytmy drugiego rodzaju. Jest jednak wiele problemów wspólnych dla obu grup algorytmów (np. analiza metrologiczna) i stąd w wielu przypadkach mogą być one rozpatrywane łącznie.

Podstawą budowy algorytmów przetwarzania są modele torów przetwarzania. Można zaobserwować dużą różnorodność w sposobach budowy tych modeli. W szczególności występują duże różnice w założeniach dotyczących struktury modeli algorytmów wsadowych i do pracy na bieżąco. Ta różnorodność ma swoje odbicie w specyfice analizy metrologicznej poszczególnych rozwiązań przyrządów programowanych. Mimo to jednak wydaje się, że możliwa jest daleko idąca unifikacja procedur takiej analizy. Tego rodzaju próby opisano w publikacjach [13][15], a pewne propozycje uogólnienia opisu algorytmów przedstawiono w [2].

4. ALGORYTMY PRZETWARZANIA



Rys.3. Algorytm przetwarzania jako przekształcanie zbiorów danych pomiarowych
Fig.3. Data processing algorithm as a transformation of measuring data series

Algorytm przetwarzania można zdefiniować jako zapis operacji numerycznych łączących dwa zbiory danych pomiarowych: wyjściowych z wejściowymi. Liczba tych operacji jest ograniczona, co oznacza, że oba zbiory danych są skończone. W przypadku algorytmów rekurencyjnych liczba danych wejściowych teoretycznie może być nieograniczona, jednak w praktyce dla algorytmów stabilnych można ją ograniczyć [10]. Ogólnie można powiedzieć, że algorytm przekształca dane reprezentujące wielkość w jednej dziedzinie na dane w innej dziedzinie, rys.3. Oba zbiory danych w ogólnym przypadku mogą reprezentować wielkości ciągłe i nieograniczone.

Algorytmy przetwarzania można ogólnie podzielić na trzy podstawowe grupy [14]:

- Algorytmy odtwarzania służące do wyznaczania wartości wielkości mierzonej na podstawie ciągu wartości zmierzonych pośrednio.
- Algorytmy transformacji pozwalające na przeniesienie danych pomiarowych z jednej dziedziny do innej; przykładem może tu być algorytm dyskretnej transformaty Fouriera DFT.
- Algorytmy filtracji, których celem jest takie przekształcanie danych w tej samej dziedzinie (głównie czasu), aby dane wyjściowe cechowały się lepszymi parametrami w sensie przyjętego kryterium. Przykładem w tym zakresie mogą być algorytmy wygładzania, których celem jest zminimalizowanie udziału błędów losowych w danych pomiarowych.

Niezależnie od przeznaczenia struktura algorytmu może być przedstawiona w postaci tablicy wiążącej wektor danych wejściowych z wektorem danych wyjściowych w następujący sposób:

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \vdots \\ X_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & \dots & a_{0M-1} \\ a_{01} & a_{11} & \dots & a_{1M-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N0} & a_{N1} & \dots & a_{N-1M-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_{K-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

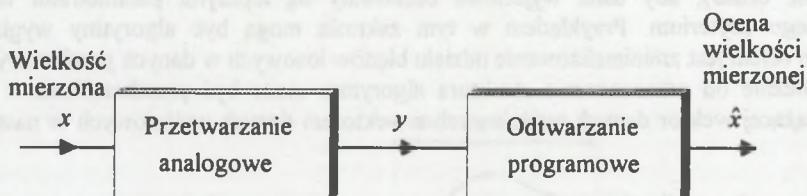
Zgodnie z rys.3 algorytm ten realizuje założone działania w sposób przybliżony - przede wszystkim dlatego, że wykonuje działania na próbkach wielkości wejściowej, których liczba ponadto jest z założenia ograniczona, ponieważ reprezentuje „okno” w teoretycznie nieograniczonej dziedzinie. Dane wyjściowe obarczone są zatem błędami własnymi algorytmu oraz błędami danych wejściowych przenoszonymi na wyjście algorytmu.

Błędy własne algorytmu można określić posługując się modelem algorytmu idealnego. Jest to algorytm generujący na wyjściu dane, które uznaje się za dokładne (wzorcowe) w określonych warunkach pracy i dla znanej wielkości wejściowej. Koncepcję budowy algorytmu idealnego można przedstawić na przykładzie algorytmów wygładzania. W tym przypadku algorytm idealny całkowicie eliminuje błędy losowe z wyników wejściowych, a zarazem jego transmitancja jest równa 1 w całym zakresie przenoszonych częstotliwości. Rzeczywiste algorytmy tylko w pewnym stopniu tłumią błędy losowe danych, a ponadto wprowadzają własne błędy dynamiczne. Porównanie danych wyjściowych algorytmu rzeczywistego i idealnego pozwala na wyznaczenie modelu błędów własnych badanego algorytmu oraz relacji między zbiorami błędów losowych na wyjściu i wejściu algorytmu [26]. Przedstawiony algorytm idealny nie daje się fizycznie realizować, natomiast możliwe jest generowanie takich

danych wyjściowych algorytmu, które umożliwiają wyznaczenie modelu błędów dla badanego rzeczywistego algorytmu.

5. ALGORYTMY ODTWARZANIA

Algorytmy odtwarzania spełniają szczególną funkcję w czujnikach próbkujących. Można powiedzieć, że stanowią podstawę działań programowych w czujniku. Dzieje się tak z kilku powodów. Praktycznie wszystkie procedury pomiaru można opisać w kategoriach odtwarzania (w pracy [21] stwierdza się wręcz, że wszystkie). Procedury odtwarzania stosowane są od wielu lat w technice pomiarowej. Ich matematyczne podstawy doczekały się wielu opracowań i analiz [19][9]. Prostota metrologicznej interpretacji wyników powoduje, że odtwarzanie można stosować w złożonych warunkach przetwarzania analogowego [23].



Rys.4. Struktura toru pomiarowego z odtwarzaniem programowym

Fig.4. Structure of the measuring chain from the programming reconstruction point of view

Odtwarzanie może być przedstawione jako sposób interpretacji pomiaru pośredniego, tak jak to pokazano na rys.4. Tor pomiarowy można w takim przypadku przedstawić w postaci dwóch członów. Pierwszy ma na celu analogowe przetworzenie wielkości wejściowej $x(t)$, której nie da się zmierzyć bezpośrednio na inną wielkość, $y(t)$, która daje się zmierzyć w ten sposób. Wyniki pomiaru wielkości $y(t)$ są przetwarzane programowo tak, aby wartości uzyskanej estymaty $\hat{x}(t)$ były równe wartościom wielkości mierzonej. Polega to ogólnie na rozwiązywaniu równań odwrotnych do równań opisujących przetwarzanie analogowe.

Zakładając, że przetwarzanie analogowe opisane jest zależnością

$$y = f(x), \quad (2)$$

to odtwarzanie realizowane jest przez rozwiązanie funkcji odwrotnej

$$\hat{x} = f^{-1}(y). \quad (3)$$

Połączenie obu równań daje w wyniku wyrażenie:

$$\hat{x} = f^{-1}(y) = f^{-1}[f(x)] = x, \quad (4)$$

które oznacza, że z definicji tor pomiarowy z odtwarzaniem jako całość realizuje funkcję przetwornika idealnego.

W ogólnym przypadku przetwarzanie analogowe realizowane jest przez łańcuch przetworników takich, jak: czujnik, układy kondycjonowania, układ próbkująco-pamiętający itp. Wielość ogniw powoduje, że przetwarzanie może być modelowane w dwojaki sposób. Pierwszy, który można nazwać sposobem całościowym, polega na opisie wszystkich

elementów toru analogowego łącznie w takiej postaci matematycznej, która wiąże bezpośrednio wielkość wyjściową y z wejściową x . Podejście to stosuje się często w sytuacjach, gdy interpretacja fizyczna procesu przetwarzania analogowego jest trudna lub nie jest istotna. Model matematyczny stanowi wówczas zależność wynikającą z eksperymentów pomiarowych i jest formalnym zapisem relacji między wejściem a wyjściem toru analogowego. Podejście takie jest powszechnie stosowane w wielu dziedzinach techniki pomiarowej. Przykładem może być spektrometria [20]. Można je również zauważyć w pracach teoretycznych (przykładowo w [29]), gdzie z założenia definiuje się modele jako całościowe, analizując skutki przyjęcia pewnych założeń upraszczających.

Odmienne podejście zastosowano m.in. w pracach [12][23], gdzie istotnym elementem budowy modelu procesu przetwarzania jest głęboka dekompozycja toru. Zasada się ona na dwóch procedurach postępowania. Z jednej strony wyodrębnia się jako osobne przetworniki wszystkie ogniwa toru, które można opisać równaniami o możliwie prostej interpretacji fizycznej, w tym także w samym czujniku [23]. Drugim działaniem jest rozdzielanie właściwości statycznych i dynamicznych [12] uzyskanych pierwotnie przetworników fizycznych. Ma to zarazem na celu uzyskanie prostych, a zatem i szybkich algorytmów odtwarzania, a także umożliwiła uzyskiwanie modelu błędów toru przetwarzania.

6. DEKOMPOZYCJA MODELI PROCESU PRZETWARZANIA

Dekompozycja stanowi przedstawienie pewnej całości w postaci zespołu elementów cząstkowych, dzięki czemu możliwe jest rozwiązywanie wielu złożonych zagadnień odtwarzania. Można wskazać wiele zagadnień, w których wykorzystywana jest dekompozycja. Zastosowana w odniesieniu do złożonych modeli, szczególnie nieliniowych, umożliwia algorytmiczną (numeryczną) realizację odtwarzania. Można ją zatem traktować jako narzędzie przekształcania ogólnych modeli analitycznych na modele cząstkowe, które można przedstawiać w postaci algorytmów przetwarzania [9] [12]. Z reguły sposób budowy modeli cząstkowych decyduje o szybkości realizacji algorytmów odtwarzania. Zatem punktem wyjścia budowy szybkich algorytmów jest użycie odpowiedniego sposobu dekompozycji.

Odtwarzanie jest rodzajem przetwarzania pomiarowego, a zatem podstawowym kryterium oceny algorytmów jest dokładność odtwarzania. Dokładność ta zależy m.in. w dużym stopniu od sposobu dekompozycji [22]. Sposób ten rzutuje także na procedury analizy metrologicznej wyników odtwarzania [23]. Można zatem powiedzieć, że rodzaj zastosowanej dekompozycji decyduje zarówno o dokładności wyniku odtwarzania, jak i o procedurze wyznaczania jego niepewności.

Można wyróżnić dwa podstawowe rodzaje dekompozycji:

- Dekompozycję formalną, polegającą na przekształceniu matematycznym opisu ogólnego na układ równań cząstkowych.
- Dekompozycję fizyczną, której celem jest zbudowanie modelu procesu przetwarzania w postaci łańcucha modeli cząstkowych, opisywanych równaniami dającymi się interpretować fizycznie i przedstawiającymi zależności między wielkościami fizycznymi.

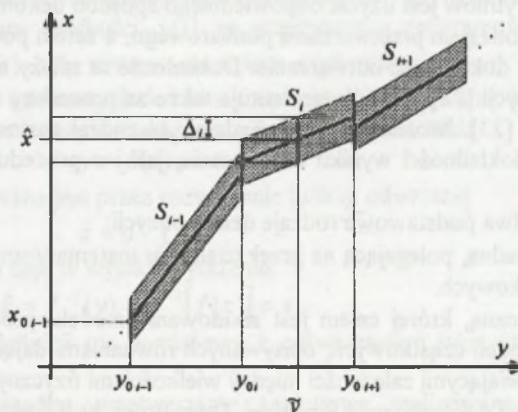
Istnieje wiele metod dekompozycji formalnej. Duża grupa tych metod dotyczy rozdzielania nieliniowych właściwości statycznych i dynamicznych. Najbardziej popularne w tym zakresie są modele Vienera, Hammersteina. Jako przykład dekomponowania modeli dynamicznych

można wymienić szeregi Volterra. W tej grupie mieści się także metoda analizowana w pracy [28], jak również rozdzielanie właściwości statycznych i dynamicznych opisane w pracach [9] [12].

Dekompozycja fizyczna jak dotychczas nie była powszechnie stosowana w praktyce. W zasadzie wykorzystywano ją wtedy, gdy nie dało się opisać toru przetwarzania w sposób ogólny. Jednak w pewnych sytuacjach ten sposób dekompozycji ma istotne zalety. Jak wykazano to w pracy [23], głęboka dekompozycja fizyczna czujnika charakteryzującego się złożoną nieliniową strukturą procesu przetwarzania pozwala na uzyskiwanie prostych algorytmów odtwarzania. Tego rodzaju konstrukcje, które cechują się prostotą modeli cząstkowych, są bardzo dogodnie do analizy metrologicznej mimo ich złożoności strukturalnej. Każdy z elementów tej struktury wprowadza błędy własne oraz przenosi błędy z wejścia na wyjście. Dzięki temu można uzyskiwać modele niepewności czujnika próbkującego pozwalające na analityczne wyznaczanie niepewności [23].

7. ODWROTNE MODELE ODCINKOWO-LINIOWE PRZETWORNIKÓW POMIAROWYCH

Modele odcinkowo-liniowe odgrywają istotną rolę w opisie przetwarzania zachodzącego w czujniku próbkującym. Pozwalają one na uzyskiwanie szybkich algorytmów odtwarzania, które mogą być realizowane na bieżąco przez stosunkowo proste mikrokontrolery w złożonych warunkach przetwarzania, gdy właściwości przetworników analogowych są opisywane łańcuchami nieliniowych równań statycznych i dynamicznych [12][23]. Ich równie istotną właściwością jest możliwość zakomponowania w modelu przetwornika wielkości charakteryzujących niepewność własną procesu przetwarzania opisywanego przez ten model, a także uzyskiwania prostych zależności między niepewnością na wyjściu i wejściu algorytmu budowanego na podstawie tego modelu. Umożliwia to budowanie modeli niepewności procesu przetwarzania w czujniku próbkującym, a tym samym analityczne wyznaczanie niepewności wyniku końcowego na podstawie znajomości cząstkowych niepewności przetwarzania.



Rys.5. Odcinkowo-liniowy model statycznych właściwości przetwornika pomiarowego
Fig. 5. Line-segment model of the transducer static properties

Odwrotny model odcinkowo-liniowy nieliniowego przetwornika statycznego wielkości x na wielkość y przedstawia rys.5. Składa się on z pewnej liczby odcinków uzyskiwanych na zasadzie aproksymacji liniowej fragmentów rzeczywistej charakterystyki statycznej przetwornika. Model ten można rozbudować do postaci wielowymiarowej, obejmującej oddziaływanie wielkości wpływających na proces przetwarzania [9]. Możliwość tablicowania współczynników odcinków aproksymujących w pamięci mikroprocesora jest bardzo istotnym czynnikiem umożliwiającym szybką realizację algorytmów budowanych na tej zasadzie.

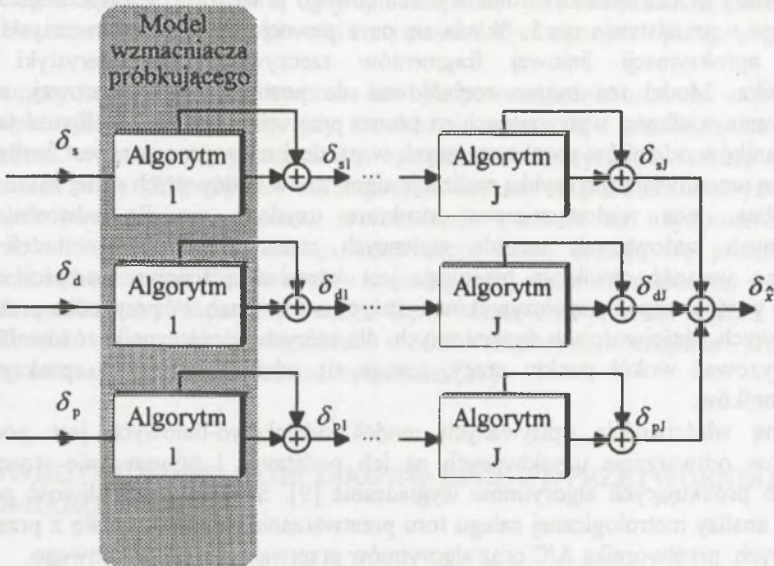
Podobną, lecz wielowymiarową strukturę uzyskuje się dla odwrotnych modeli dynamicznych budowanych metodą zmiennych stanu [9][12]. Dla modeli liniowych odtwarzana wartość chwilowa przebiegu jest kombinacją liniową wartości chwilowych przebiegu wyjściowego i współczynników o stałych wartościach. W przypadku przetworników o nieliniowych właściwościach dynamicznych, dla których współczynniki równania stanu dają się linearyzować wokół punktu pracy, stosuje się odcinkowo-liniową aproksymację tych współczynników.

Istotną właściwością opisywanych modeli odcinkowo-liniowych jest podobieństwo algorytmów odtwarzania uzyskiwanych na ich podstawie i powszechnie stosowanych w czujnikach próbkujących algorytmów wygładzania [9]. Stwarza to możliwość prowadzenia jednolitej analizy metrologicznej całego toru przetwarzania składającego się z przetworników analogowych, przetwornika A/C oraz algorytmów przetwarzania programowego.

8. MODELOWANIE BŁĘDÓW W CZUJNIKU PRÓBKUJĄCYM

Głęboka dekompozycja fizyczna wraz z zastosowaniem modelowania odcinkowo-liniowego umożliwiła budowanie modeli błędów procesu przetwarzania w czujniku próbkującym w sposób zilustrowany na rys.6. Każdy algorytm przetwarzania reprezentowany jest na tym rysunku trzykrotnie - jako element modelujący właściwości algorytmu dla błędów statycznych, dynamicznych i losowych. Wynika to z analiz przedstawionych w pracach [9][15], wskazujących, że algorytmy przetwarzania w różny sposób przenoszą wymienione rodzaje błędów z wejścia na wyjście, a każdy z algorytmów może również wprowadzać specyficzne błędy własne trójakiego rodzaju. Biorąc ponadto pod uwagę, że błędy własne algorytmów odtwarzania mogą obejmować również odpowiednie błędy przetwarzania analogowego [17][24], opisywany schemat może być traktowany jako ogólny model wszystkich błędów występujących w trakcie przetwarzania realizowanego przez czujnik próbkujący.

Poszczególne elementy modelu z rys.6 mogą być traktowane jako elementarne „przetworniki błędów”. W danym momencie realizacji każdy z algorytmów przenosi wartości chwilowe błędów z wejścia na wyjście ze stałym współczynnikiem, którego wartość jest określona przez punkt pracy na charakterystyce odcinkowo-liniowej. Uzyskuje się więc model liniowy, który w każdym momencie pracy algorytmu i w każdym punkcie łańcucha przetwarzania umożliwia analityczne wyznaczanie wartości poszczególnych błędów. Ma to szczególne znaczenie dla symulacyjnej analizy błędów procesu przetwarzania, pozwalającej na ocenę wzajemnej relacji poszczególnych rodzajów błędów w różnych punktach modelu. Pozwala to na proponowanie działań zmierzających do zmniejszenia wartości dominujących rodzajów błędów, umożliwiając tym samym zwiększanie dokładności przetwarzania.

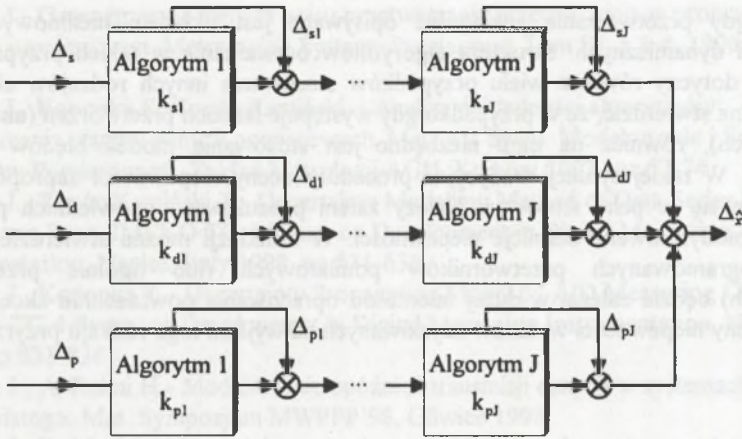


Rys.6. Model błędów czujnika próbkującego; δ_s - błąd statyczny, δ_d - błąd dynamiczny, δ_p - błąd o charakterze losowym

Fig.6. General error model of the sampling sensor; $\delta_s, \delta_d, \delta_p$ - static, dynamic and random errors, respectively

9. MODEL NIEPEWNOŚCI CZUJNIKA PRÓBKUJĄCEGO

Traktując niepewność jako miarę zbioru błędów [15][18] można przekształcić model błędów z rys.6 na model niepewności czujnika próbkującego przedstawiony na rys.7. Niezbędne są do tego celu definicje wyznaczania zbiorów błędów statycznych, dynamicznych i losowych, a także wskazanie procedury składania niepewności cząstkowych. W pracy [24] zastosowano procedurę składania geometrycznego, co oznacza, że każdy węzeł sumacyjny na rys.7 oznaczony symbolem \otimes opisuje operację pierwiastkowania sumy kwadratów niepewności składowych. Wyniki pracy [24] wskazują, że przy dużej liczbie źródeł błędów składanie geometryczne daje wyniki akceptowalne w praktyce pomiarowej. Scharakteryzowana koncepcja budowania modelu niepewności została przedstawiona w pracy [18]. Zgodnie z tą koncepcją można korygować wynik geometrycznego wyznaczania niepewności w przypadku wystąpienia istotnego stopnia skorelowania źródeł błędów, a także w przypadku, gdy kształty rozkładów błędów nadmiernie wpływają na wynik składania.



Rys. 7. Ogólny model niepewności czujnika próbkującego; Δ_s - niepewność statyczna, Δ_d - niepewność dynamiczna, a Δ_p - niepewność losowa

Fig. 7. General uncertainty model of the sampling sensor; $\Delta_s, \Delta_d, \Delta_p$ - static, dynamic and random uncertainties, respectively

Model pokazany na rys. 7 ma istotną właściwość, mianowicie poszczególne elementy modelu przenoszą niepewności ze stałym współczynnikiem oznaczonym odpowiednio jako k_s, k_d i k_p . Można mówić o tym modelu, że jest liniowy w ogólnie nieliniowych warunkach przetwarzania. Dzięki temu można uzyskiwać proste procedury obliczania niepewności wyniku końcowego, a tym samym analitycznie (liczalnie) wyznaczać niepewności wyniku pomiaru.

10. UWAGI KOŃCOWE

Problemy przedstawione w artykule stanowią jedynie pewien fragment rozległej tematyki dotyczącej programowanych przetworników pomiarowych. Problemy te przedstawiono głównie w sposób akcentujący zagadnienia związane z czujnikami próbkującymi. Należy zauważyć, że czujniki próbkujące stanowią specyficzną grupę w szerokim wachlarzu przyrządów pomiarowych, nazywanych ogólnie przetwornikami inteligentnymi. Właściwości takich przetworników można rozpatrywać w różny sposób; przykładem innego rodzaju spojrzenia na tego rodzaju problematykę jest praca [3]. Cechą charakterystyczną podejścia zastosowanego w niniejszym artykule jest akcentowanie problemów dokładności, a w szczególności możliwości analitycznego wyznaczania niepewności na podstawie modeli niepewności czujnika próbkującego. Zagadnienie to wydaje się szczególnie istotne w odniesieniu do przetworników programowanych. Brak jest ogólnie akceptowanych metod oceny dokładności takich przetworników. Metody te muszą w sposób spójny uwzględniać występowanie błędów przetwarzania analogowego, analogowo-cyfrowego i programowego. Ponadto struktura przetwarzania w takich przetwornikach jest często złożona. Występują

przypadki, gdy przetwarzanie analogowe opisywane jest układem nieliniowych równań statycznych i dynamicznych. Struktura algorytmów odtwarzania w takich przypadkach jest złożona, co dotyczy również wielu przypadków stosowania innych rodzajów algorytmów. Ogólnie można stwierdzić, że w przypadku gdy występuje łańcuch przetworzeń (analogowych, programowych), również na ogół niezbędne jest stosowanie modeli błędów w postaci łańcuchowej. W takiej sytuacji tradycyjne procedury oceny niepewności zaproponowane w [31] nie dają się w pełni stosować. Należy zatem poszukiwać odpowiednich procedur w oparciu o zmodyfikowane definicje niepewności. W konkluzji można stwierdzić, że dalszy rozwój programowanych przetworników pomiarowych (lub ogólnie przetworników inteligentnych) będzie zależał w dużej mierze od opracowania powszechnie akceptowalnych procedur oceny niepewności wyników uzyskiwanych na wyjściu tego rodzaju przyrządów.

LITERATURA

1. Badźmirowski K., Jackiewicz B. - Kierunki rozwoju elektronicznych systemów pomiarowych. Mat. Krajowego Kongresu Metrologii Gdańsk'98, Tom V, Politechnika Gdańska 1998, str.5-16
2. Barwicz A. - Towards Integration of Measuring Systems: Review of the Research Program at UQTR. Proc. IMEKO TC-4 Workshop on ADC Modelling, Smolenice, Slovak Rep. 1996, pp.56-65
3. Bolikowski J. - Podstawowe właściwości inteligentnych przetworników pomiarowych. Metrologia i Systemy Pomiarowe. Tom II, Zeszyt 1, PWN, Warszawa 1995
4. Bolikowski J i inni- Podstawy projektowania inteligentnych przetworników pomiarowych. WSI seria Monografie nr 68, Zielona Góra 1993
5. Bryzek J. - Zaawansowane przetwarzanie sygnałów w czujnikach inteligentnych. Mat. III Konf. Nauk. Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne COE'94, Zegrze 1994
6. Ciesielski G. - Modelowanie i korekcja wielowymiarowych stacjonarnych systemów pomiarowych za pomocą operatorów nieliniowych. Rozprawa habilitacyjna. Zeszyty Naukowe Pol. Łódzkiej, z. nr 669, Łódź 1994
7. Gajda J., Szyper M., Twardowski T. - Badania modelowe w zastosowaniu do parametrycznej i strukturalnej optymalizacji systemów pomiarowych. Mat. VII Symp. Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Zakład Metrologii AGH, Kraków 1997
8. Jachowicz R. - Czujniki inteligentne - zintegrowane czujniki półprzewodnikowe do współpracy z komputerowymi systemami pomiarowymi. Mat. Konf. Metrologia Wspomagana Komputerowo MWK'93, Zegrze 1993
9. Jakubiec J. - Bieżące programowe odtwarzanie wartości chwilowych dynamicznych przebiegów wejściowych nieliniowych przetworników pomiarowych. Monografia. ZN Pol. Śl. s. Elektryka, z. 111, Gliwice 1988
10. Jakubiec J. - Metrologiczne właściwości pewnej postaci szeregu czasowego jako sposobu przedstawiania rekurencyjnych algorytmów przetwarzania danych pomiarowych. Archiwum Elektrotechniki, Tom XL, z.3/4, 1991 str.723-735
11. Jakubiec J. - Program dystrybucji zadań w mikroprocesorowym przyrządzie pomiarowym. ZN Pol. Śl., s. Elektryka, z. 134, Gliwice 1994, str.43-51

12. Jakubiec J.- Geometryczna metoda opisu przetwarzania przetwarzania w programowanym czujniku pomiarowym. *Metrologia i Systemy Pomiarowe*, Tom III, z.3-4, 1996, str.225-249
13. Jakubiec J., Konopka K, Topór-Kamiński .- Analiza dokładności algorytmów przetwarzania ciągów danych pomiarowych. *Mat. VII Symp. Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Zakład Metrologii AGH, Kraków 1997*, str.67-74
14. Jakubiec J., Topór-Kamiński T.- Uncertainty Modelling Method of Data Series Processing Algorithms. *Proc. IMEKO TC-4 Symp. on Development in Digital Measuring Instrumentation, Naples, Italy 1998*, pp.631-636
15. Jakubiec J., Konopka K.- Uncertainty Propagation Model od A/D Measuring Chain. *Proc. IMEKO TC-4 Symp. on Development in Digital Measuring Instrumentation, Naples, Italy 1998*, pp.831-836
16. Jakubiec J., Al Raimi H.- Modelowanie opóźnień transmisji danych w systemach czasu rzeczywistego. *Mat. Sympozjum MWPPP'98, Gliwice 1998*
17. Jakubiec J., Roj J.- Metoda modelowania niepewności w torach pomiarowych o złożonej strukturze przetwarzania. *Mat. Konf. Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i w Przemśle SP'98. Zielona Góra 1998*, str.65-80
18. Jakubiec J., Konopka K, Topór-Kamiński T.- Niepewność jako miara zbioru błędów. *Mat. Symp. MWPPP'98, Gliwice 1998*
19. Michta E.- Wpływ architektury sieciowej na zasady projektowania rozproszonych systemów pomiarowo-kontrolnych. *Mat. Krajowego Kongresu Metrologii Gdańsk'98, Tom , Politechnika Gdańska 1998*, str.3-11
20. Morawski R. Z.- Metody odtwarzania sygnałów pomiarowych. *Monografia 1. Metrologia i Systemy Pomiarowe, Warszawa 1989*
21. Morawski R.Z., Szczeciński L., Barwicz A.-Deconvolution Algorithms for Instrumental Applications: A Comparative Study, *Journal of Chemometrics, Vol.9, No 1, Jan-Feb 1995*, pp.3-20
22. Morawski R.Z.- Zadania odwrotne w metrologii. *Mat. Konf. Podstawowe Problemy Metrologii, Gliwice-Ustroń 1998*, str.37-49
23. Roj J.- Modele odcinkowo-liniowe w zastosowaniu do budowy szybkich algorytmów korekcji błędów systematycznych złożonych nieliniowych przetworników pomiarowych. *Mat. Krajowego Kongresu Metrologii Gdańsk'98, Politechnika Gdańska 1998*
24. Roj J.- Pomiar stężenia mieszanki palnej .*Rozprawa doktorska. Wydz. Elektr. Pol. Śl., Gliwice 1998*, str.261-268
25. Sacha K.- QNX - system operacyjny. *WNT, Warszawa 1995*
26. Stopa G.- Zastosowanie quasi-systemów operacyjnych do tworzenia mikroprocesorowych systemów pomiarowych. *Mat. XXX Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów, Szczecin 1998*, str.451-456
27. Topór-Kamiński T.- Definiowanie niepewności cząstkowych algorytmów przetwarzania ciągów danych pomiarowych. *Mat. VIII Symp. Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Zakład Metrologii AGH, Kraków 1998*, str.304-311
28. Winiecki W.- Przyrządy wirtualne i ich modele. *Mat. Konf. Podstawowe Problemy Metrologii, Gliwice-Ustroń 1998*, str.356-365
29. Żuchowski A. Niektóre metody aproksymacji wymiernych transmitancji za pomocą szeregów $\sum_i k_i \exp(-sT_i)$. *Mat. VIII Symp. Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Zakład Metrologii AGH, Kraków 1998*, str.51-58

30. Żuchowski A. - Odtwarzanie stanu wejścia toru pomiarowego z wykorzystaniem uśrednionego różniczkowania i modelu Strejca. Mat. Sympozjum MWPPP'98, Gliwice 1998
31. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. ISO/IEC/OIML/BIPM 1992

Wpłynęło do redakcji dnia 1 grudnia 1998 r.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Adam Żuchowski

Abstract

Common application of microprocessors and microcontrollers in measuring instruments and systems causes wider use of programming methods to obtain required measuring properties. A measuring chain whose characteristics are shaped up in a programming way is called a programmed transducer. It is useful to analyse properties of such a transducer considering a sampling sensor whose operation consists in delivering periodically digital instantaneous values of a measured quantity at its output. Functioning of the sampling sensor can be described in reconstruction categories. The reconstruction algorithm consists in solving an inverse mathematical model of the sensor analog part. Deep decomposition connected with using the line-segment partial models of static and dynamic properties of the sensor enables to obtain relatively simple structures of its error model when both the static and dynamic properties of the sensor are described by nonlinear equations.

One can separate three main kinds of error sources of the measuring process in the sampling sensor: static, dynamic and random. The error model is a base for error analysis which allows to point out dominating error sources and then to take steps in order to decrease their influence on the sensor inaccuracy. As this model defines properly three kinds of uncertainty, it can be used to calculate uncertainty of data at the sensor output. A calculation procedure in which geometrical rule of uncertainty composition is applied has been presented in the paper.