

Błędy powodowane opóźnieniami w systemie pomiarowo-sterującym

Jerzy Jakubiec *

Realizacja zadań w systemie pomiarowo-sterującym powoduje powstawanie opóźnień w propagacji informacji pomiarowej z wejść na wyjścia systemu. Opóźnienia te zależą zarówno od czasu korzystania przez zadania z zasobów systemu, jak i od momentów inicjacji zadań współużytkujących te zasoby. Efektem opóźnień są błędy pomiaru wielkości zmiennych w czasie. W artykule scharakteryzowano mechanizm powstawania opóźnień oraz sposób tworzenia probabilistycznego ich opisu i powodowanych przez nie błędów.

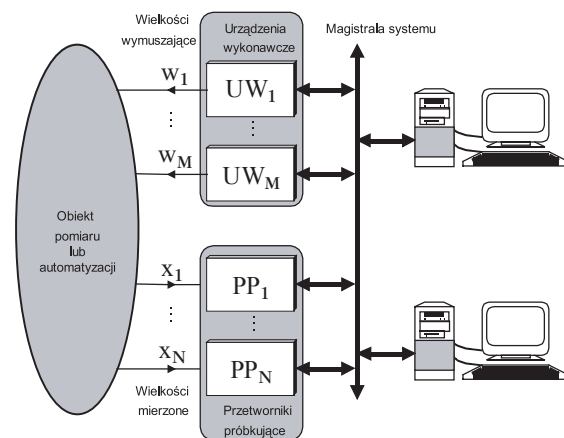
Errors caused by delays in measuring-control system. Realization of tasks in a measuring-control system causes arising delays in propagation of measurement information from inputs to outputs of the system. The delays depend on time of use of the system resources by the tasks and on initiation moments of the tasks jointly using these resources. When the input quantities of the system are varying in time, specific errors are effects of the delays. The paper characterizes mechanism of the delay arising and the way of probabilistic description of both the delays and the errors caused by them.

Model funkcjonalny systemu

Jako punkt wyjścia rozważań na temat opóźnień występujących w systemie pomiarowo-sterującym może posłużyć model funkcjonalny systemu pokazany na rys. 1. W modelu tym wyróżnia się trzy rodzaje urządzeń: przetworniki próbkujące, urządzenia wykonawcze i komputery. Urządzenia te komunikują się za pomocą magistrali, która symbolizuje tu media komunikacyjne systemu.

Przetworniki próbkujące realizują pomiar wartości chwilowych zmiennych w czasie wielkości wejściowych systemu $x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)$, charakteryzujących stan obiektu. Wielkości te są poddawane przetwarzaniu analogowemu, próbkowaniu i kwantowaniu, a na koniec przetwarzaniu programowemu realizującemu algorytm odtwarzania [1]. Po takim ciągu działań na wyjście przetworników próbkujących są przekazywane oceny wartości chwilowych wielkości wejściowych oznaczane odpowiednio jako $\hat{x}_1(t_{s1}), \hat{x}_2(t_{s2}), \dots, \hat{x}_N(t_{sN})$, gdzie $t_{s1}, t_{s2}, \dots, t_{sN}$ są chwilami próbkowania.

Oceny wartości chwilowych stanowią dane przekazywane do odbiorników, którymi są urządzenia wykonawcze wytwarzające na podstawie dostarczanych danych wielkości sterujące systemem oznaczone jako $w_1(t), w_2(t), \dots, w_M(t)$ lub komputery. Dane przekazane do komputera służą do programowego wyznaczenia wielkości mierzonych pośrednio przy użyciu odpowiednich algorytmów oraz mogą być poddawane wizualizacji.

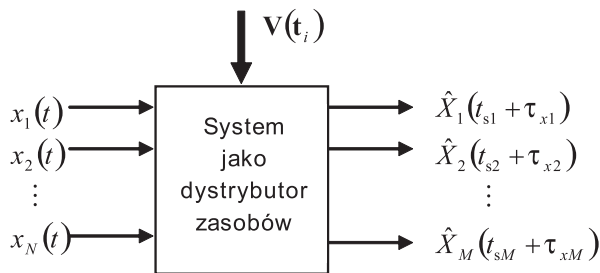


Rys. 1. Ogólna struktura systemu pomiarowo-sterującego

System jako dystrybutor zasobów

Schemat z rys. 1 określa podstawowe funkcje spełniane przez elementy systemu w procesie propagacji informacji pomiarowej od wejść systemu do jego wyjść. W procesie tym sygnały pomiarowe (wielkości wejściowe) są przetwarzane analogowo, próbkowane, kwantowane, a wyniki cyfrowe są przetwarzane programowo i przesyłane do innych urządzeń. Działania

* Prof. dr hab. inż. Jerzy Jakubiec – Politechnika Śląska, Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej



Rys. 2. Ogólny model systemu pomiarowo-sterującego jako dystrybutora zasobów służących do uzyskiwania wartości chwilowych wielkości wejściowych

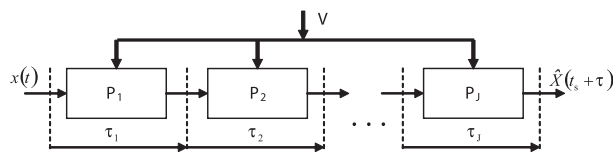
te wymagają zaangażowania odpowiednich zasobów systemu. Z punktu widzenia wymienionych działań zasoby te obejmują:

- układy pomiarowe składające się z czujników oraz kart (modułów) przetwarzania analogowo/cyfrowego
- procesory
- media transmisyjne.

Przyjmijmy, że każde działanie w systemie związane z korzystaniem z zasobu nazywane jest zadaniem. Propagacja informacji związana jest z wielokrotnym korzystaniem z zasobów, a tym samym wymaga realizacji wielu zadań. Stąd z pomiarowego punktu widzenia rozpatrywany system stanowi zbiór zasobów, które użytkują poszczególne zadania. Zasoby te są ograniczone, a zatem zadania muszą rywalizować o ich użytkowanie.

Występowanie interakcji wielkości mierzonych w trakcie procesu propagacji informacji pomiarowej z wejścia na wyjście systemu powoduje, że opóźnienia muszą być analizowane w sposób kompleksowy, czyli powinny być oparte na całościowym modelu systemu. Punkt wyjścia do dalszych rozważań może stanowić ogólny model pokazany na rys. 2. W modelu tym system jest traktowany ogólnie jako dystrybutor różnego rodzaju zasobów niezbędnych do uzyskania zbioru ocen $\hat{X}_1, \hat{X}_2, \dots, \hat{X}_M$ wielkości wyjściowych systemu na podstawie zbiorów wyników pomiaru wartości chwilowych wielkości wejściowych $x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)$. Oceny te są wyznaczane dla określonych chwil $t_{s1}, t_{s2}, \dots, t_{sM}$ interpretowanych jako nominalne momenty próbkowania odpowiednich wielkości. Na skutek rywalizacji o ograniczone zasoby systemu, jak również z powodu występowania różnego rodzaju zdarzeń wewnętrznych i zewnętrznych wymagających jego reakcji oznaczonych na rys. 2 symbolem $V(t_i)$, propagacja wyników na wyjście podlega opóźnieniom. W efekcie poszczególne oceny docierają na wyjście z opóźnieniami w stosunku do chwil próbkowania, wynoszącymi odpowiednio $\tau_{x1}, \tau_{x2}, \dots, \tau_{xM}$.

W celu wyznaczenia wartości opóźnień w systemie niezbędna jest dekompozycja modelu z rys. 2 na zbiór modeli cząstkowych opisujących propagację informacji dla poszczególnych wielkości mierzonych. Każdy z modeli cząstkowych może być przedstawiony jako łańcuch zadań wprowadzających właściwe dla siebie opóźnienia, jak to pokazano ogólnie na rys. 3. Wartość opóźnienia cząstkowego zależy zarówno od właściwości poszczególnych zadań, jak i wpływu czynników

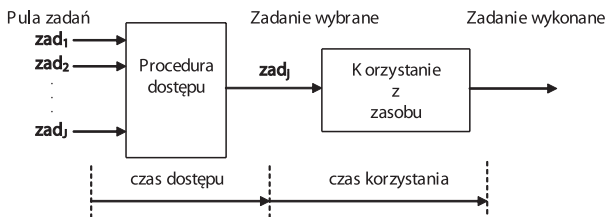


Rys. 3. Model propagacji informacji dla wielkości X . $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_j$ są opóźnieniami wprowadzanymi przez kolejne zadania oznaczone jako P_1, P_2, \dots, P_j . V jest wektorem zdarzeń wpływających na realizację zadań

(zdarzeń) zewnętrznych. Opóźnienie wypadkowe jest sumą opóźnień cząstkowych.

Opis analityczny opóźnień cząstkowego

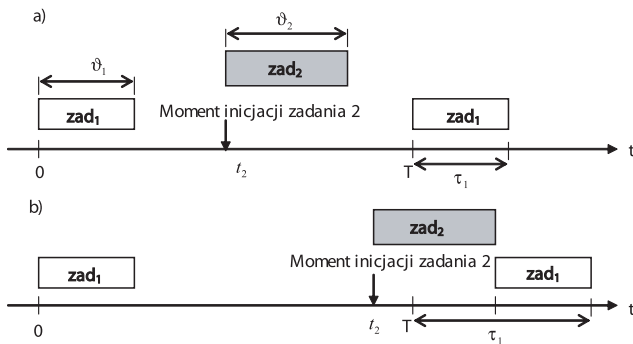
Realizację zadań pod kątem ich opisu czasowego można ogólnie rozpatrywać w sposób pokazany na rys. 4. Zadanie jest realizowane w dwóch fazach. W pierwszej uzyskiwany jest dostęp do zasobu w rywalizacji z innymi zadaniami, w drugiej fazie zadanie wykorzystuje zasób do swoich celów. Realizacja każdej z faz wymaga czasu, odpowiednio nazywanego czasem dostępu i czasem korzystania z zasobu. Czas dostępu ma zmienną wartość zależną od rodzaju procedury dostępu, sposobu inicjacji zadań oraz czasów ich realizacji i ogólnie może być opisany funkcją zależną od momentów inicjacji zadań. Gdy zadanie ma jakiś zasób wyłącznie do swojej dyspozycji, czas ten jest równy zeru. Czas korzystania ma z reguły stałą wartość równą czasowi realizacji zadania.



Rys. 4. Ogólny schemat wykorzystywania zasobu systemu przez zadanie

Przykładowo w sytuacji, gdy pewna pula zadań korzysta z układu pomiaru A/C (komutator, układ P/P oraz przetwornik A/C), procedura dostępu może polegać na uszeregowaniu zadań w kolejkę oczekującą na przyłączenie na wejście układu P/P. Czas dostępu określonego zadania jest w takim przypadku różnicą między momentem uzyskania dostępu a momentem inicjacji próbkowania i zależy od liczby zadań wyprzedzających w kolejce to zadanie. Czas korzystania z zasobu jest czasem konwersji A/C.

Zadania mogą być inicjowane okresowo lub w dowolnych momentach określonych przez występowanie zdarzeń, które mogą zachodzić w obiekcie lub w samym systemie. Wiele z tych zdarzeń zachodzi przypadkowo, stąd w ogólnym przypadku celowy jest pro-



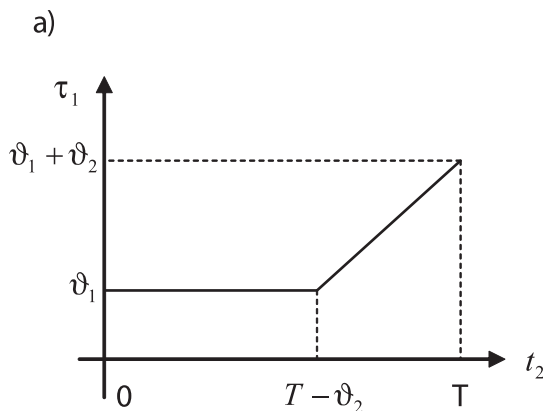
Rys. 5. Rywalizacja dwóch zadań, a) zadanie 2 nie powoduje dodatkowego opóźnienia w realizacji zadania 1, b) realizacja zadania 2 powoduje powstanie opóźnienia dodatkowego zadania 1

babilistyczny opis opóźnień. W niniejszej pracy używa się opisu opóźnień w postaci funkcji gęstości prawdopodobieństwa, gdyż jest to niezbędne do uzyskania rozkładów błędów powodowanych opóźnieniami, które są składane z innymi błędami w systemie. Stosowane są również inne środki matematyczne opisu opóźnień. Informacje na ten temat można znaleźć m.in. w monografiach [2, 3, 4].

Problematykę tworzenia opisu matematycznego opóźnień w systemach dogodnie jest przedstawić na prostym przykładzie zilustrowanym na rys. 5. Przyjmijmy, że o dostęp do jakiegoś zasobu rywalizują dwa zadania: **zad₁** i **zad₂**, o czasach realizacji odpowiednio ϑ₁ i ϑ₂. Zadanie pierwsze jest inicjowane co okres T, moment inicjacji drugiego może się zmieniać w przedziale [0, T]. Zadania te nie mogą się wzajemnie wywłaszczać, czyli odbierać sobie zasobu w trakcie realizacji. Ponadto **zad₁** ma wyższy priorytet, co oznacza, że w sytuacji gdy w tym samym momencie są zainicjowane obydwa zadania, wtedy jako pierwsze zostanie zrealizowane **zad₁**.

Zmieniając w sposób ciągły moment inicjacji zadania 2 w granicach od 0 do T, uzyskuje się równanie

$$\tau_1 = g(t_2) = \begin{cases} \vartheta_1 & \text{dla } 0 \leq t_2 \leq T - \vartheta_2 \\ t_2 + \vartheta_1 + \vartheta_2 - T & \text{dla } T - \vartheta_2 \leq t_2 < T \end{cases} \quad (1)$$



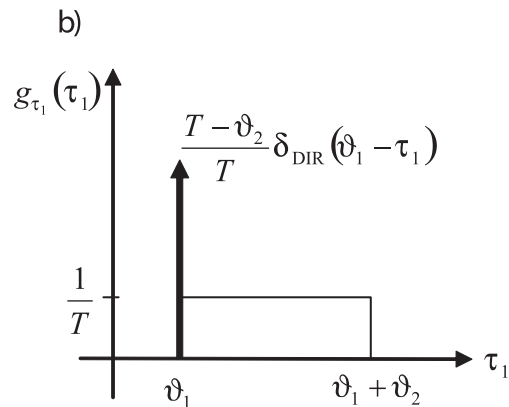
opisujące zależność całkowitego czasu propagacji wielkości z wejścia na wyjście zadania 1 od momentu t₂. Czas ten stanowi opóźnienie całkowite (nazywane dalej opóźnieniem) zadania 1. Postać graficzną równania (1) przedstawia rys. 6a.

Zakładając, że zadanie 2 aktywizowane jest w sposób losowy, opóźnienie τ₁ zadania 1 ma taki sam charakter. Rozkład tego opóźnienia można uzyskać za pomocą funkcji charakterystycznych, gdy znany jest analityczny opis τ₁ w funkcji momentu inicjacji t₂ zadania 2 oraz funkcja gęstości prawdopodobieństwa momentu t₂, w sposób opisany w pracach [5, 6]. Przykładowo, gdy prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia inicjującego jest jednakowe w przedziale [0, T] funkcją gęstości prawdopodobieństwa opóźnienia τ₁ ma postać

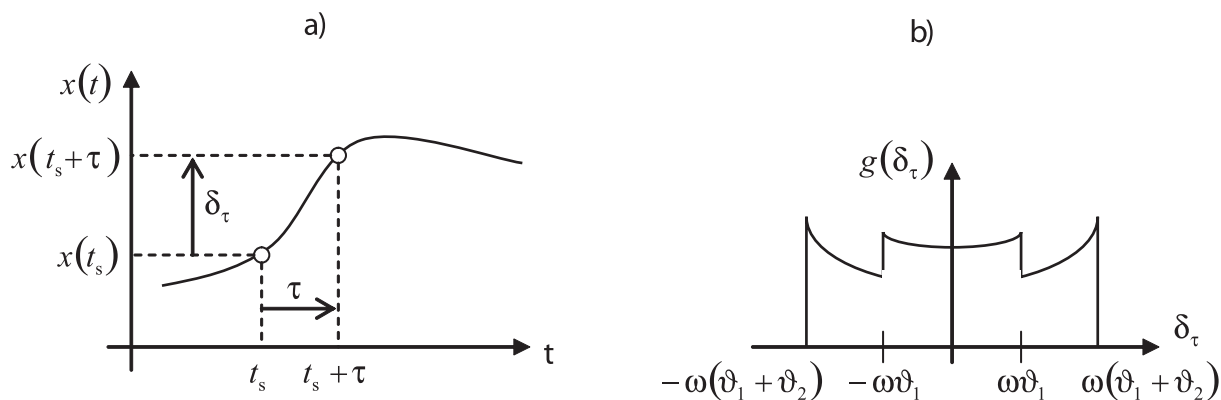
$$g_{\tau_1}(\tau_1) = \begin{cases} \frac{T - \vartheta_2}{T} \delta_{\text{DIR}}(\vartheta_1 - \tau_1) + \frac{1}{T} & \text{dla } \tau_1 \in [\vartheta_1, \vartheta_1 + \vartheta_2] \\ 0 & \text{dla } \tau_1 \notin [\vartheta_1, \vartheta_1 + \vartheta_2] \end{cases} \quad (2)$$

gdzie δ_{DIR} jest funkcją delta Diraca (rys. 6b).

Scharakteryzowany powyżej analityczny sposób wyznaczania rozkładów opóźnień może być zastosowany tylko w bardzo prostych przypadkach. Jak to pokazano w pracy [6] w sytuacji, gdy wzrasta liczba zadań „przeszkadzających” stopień złożoności tego rodzaju opisu jest tak duży, że przestaje on być przydatny i trzeba poszukiwać innych środków analizy tego rodzaju opóźnień. Dobre wyniki daje w tym wypadku zastosowanie symulacji z wykorzystaniem modeli zjawisk powodujących opóźnienia. W pracy [6] opisano model wielozadaniowego systemu operacyjnego zbudowany dla celów badania opóźnień powodowanych współbieżną realizacją zadań programowych, jak również wykazano jego przydatność przez porównanie wyników uzyskanych przy jego użyciu z wynikami otrzymanymi na podstawie pomiarów opóźnień w systemie eksperymentalnym zarządzanym systemem operacyjnym QNX.



Rys. 6. a) Zależność opóźnienia τ₁ zadania 1 w funkcji momentu t₂ inicjacji zadania 2, ϑ₁ i ϑ₂ są odpowiednio czasami realizacji zadania 1 i 2, b) funkcja gęstości prawdopodobieństwa opóźnienia τ₁ w przypadku, gdy zadanie 2 jest inicjowane zgodnie z rozkładem jednostajnym w przedziale [0, T], a związek między τ₁ i t₂ opisuje rys. 6a



Rys. 7. a) Ilustracja powstawania błędu δ_τ spowodowanego opóźnieniem propagacji wyniku w systemie pomiarowo-sterującym. t_s jest momentem nominalnego próbkowania wielkości mierzonej, τ jest opóźnieniem, b) rozkład błędów spowodowanego opóźnieniem dla sinusoidalnie zmiennej wielkości mierzonej o pulsacji ω oraz rozkładu opóźnienia jak na rys. 6b.

Błąd powodowany opóźnieniem

Jeśli jest wykonywany pomiar wartości chwilowej wielkości zmiennej w czasie, to opóźnienie wyniku powoduje powstawanie błędów w sposób pokazany na rys. 7a. Błąd ten stanowi różnicę między wartością wielkości w chwili nominalnego próbkowania t_s , a wartością tej wielkości w chwili dostarczenia wyniku do odbiornika. Wartość tego błędów zależy zarówno od szybkości zmian wielkości mierzonej, jak i wartości opóźnienia τ .

Zgodnie z rys. 7a błąd powodowany opóźnieniem jest definiowany jako

$$\delta_\tau(t_s) = x(t_s + \tau) - x(t_s), \quad (3)$$

gdzie t_s jest momentem nominalnego próbkowania wielkości mierzonej, czyli takim, do którego zostają odnoszone wyznaczone wartości wielkości mierzonej. Wyznaczanie wartości tego błędów jest możliwe dla określonych przebiegów wielkości mierzonej, przy czym dla celów analizy błędów z reguły przyjmuje się przebieg sinusoidalnie zmienny. Przykładowy rozkład błędów spowodowanego opóźnieniem dla tego rodzaju przebiegu pokazano na rys. 7b.

Uwagi końcowe i wnioski

Z ogólnego modelu przedstawionego na rys. 3 wynika, że opóźnienie wypadkowe od momentu rozpoczęcia pomiaru wielkości do momentu dotarcia wyniku na wyjście systemu, jest sumą opóźnień cząstkowych wprowadzanych przez poszczególne zadania. Każde z tych zadań może być opisywane przez pryzmat rywalizacji o określony zasób systemu, w związku z czym opóźnienie wprowadzane przez to zadanie zależy od czasu dostępu do zasobu i czasu jego użytkowania. W niniejszej pracy opóźnienie to ma opis probabilistyczny, którego przykład pokazuje rys. 6b. Zatem roz-

kład opóźnienia wypadkowego toru propagacji wyniku może być wyznaczony za pomocą splotu funkcji gęstości prawdopodobieństwa opóźnień cząstkowych. Jest to jednak zadanie złożone, a ponadto samo określanie analitycznego opisu rozkładów cząstkowych jest bardzo trudne. Stąd najlepszym sposobem wyznaczania opóźnień, a zarazem i błędów przez nie powodowanych, jest zastosowanie symulacji.

Błędy powodowane opóźnieniami kumulują się z błędami pomiaru i błędami przetwarzania danej wielkości, a tym samym wpływają na dokładność wyniku dostarczanego do odbiorcy. Niezbędna jest zatem analiza tych błędów w celu ewentualnego zmniejszenia ich wpływu. Niepewności powodowane przez błędy niedające się zmniejszyć, muszą być uwzględniane w budżecie niepewności systemu.

Bibliografia

- [1] Jakubiec J., Roj J.: *Pomiarowe przetwarzanie próbkujące*. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2000.
- [2] Kwiecień A.: *Analiza przepływu informacji w komputerowych sieciach przemysłowych*. Monografia. Studia Informatica, Vol. 23, Number 1 (47), Gliwice 2002.
- [3] Michta E.: *Modele komunikacyjne sieciowego systemu pomiarowo-sterującego*. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Zielonogórskiej, Zielona Góra 2000.
- [4] Winiecki W.: *Wirtualne przyrządy pomiarowe*. Monografia. Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [5] Jakubiec J., Al. Raimi H.: *Modelowanie transmisji danych w systemach pomiarowych czasu rzeczywistego*. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Elektryka z. 165, Gliwice 1999, s. 109-120.
- [6] Al Raimi H.: *Badanie błędów związanych z opóźnieniami w transmisji danych w systemach pomiarowych*. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 2003.