

## Zastosowanie algorytmów symulacji zdarzeń dyskretnych do wyznaczania opóźnień transmisji danych w rozproszonych systemach pomiarowo - sterujących

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zastosowanie algorytmów symulacji zdarzeń dyskretnych do określenia wpływu przesunięć czasowych związanych z uruchamianiem poszczególnych węzłów na wartości opóźnień transmisji danych w systemie. Zaprezentowano przykładowe wyniki badań symulacyjnych systemu pracującego wg zasady peer to peer. Wykazano, że przedstawiona metodyka określania właściwości czasowych rozproszonych systemów pomiarowo – sterujących może być przydatna podczas projektowania tego typu systemów.

**Abstract.** Using an algorithms of discrete events simulation to assessment of an influence of time shifts in start of system nodes run on data transmission delay in measuring and control system is described. Results of peer to peer system simulation are presented. The described methodology for determining the time properties of distributed measuring and control systems may be useful when designing such systems. (Application of discrete event simulation algorithms for evaluation of data transmission delay in distributed measuring and control system).

**Słowa kluczowe:** rozproszone systemy pomiarowo-sterujące, symulacja zdarzeń dyskretnych, opóźnienia transmisji danych, zasada peer to peer.

**Keywords:** distributed measuring and control system, discrete events simulation, data transmission delay, peer to peer principle.

### Wstęp

Podstawowe zadania stawiane przed rozproszonymi systemami pomiarowo-sterującymi (RSPS) to przetwarzanie i przesyłanie wyników pomiarów mierzonych wielkości pomiędzy węzłami systemu. Wyznaczenie parametrów opisujących właściwości projektowanego RSPS i zarazem jego ocena może być przeprowadzona z zastosowaniem metod analitycznych lub symulacyjnych. Ze względu na dużą złożoność RSPS stosowanie metod analitycznych jest ograniczone. Zdecydowanie większymi możliwościami w tym zakresie cechują się metody symulacyjne.

Modelowanie systemów pomiarowo-sterujących może być prowadzone z wykorzystaniem metod formalnych (np. sieci Petriego) [1], [2], [3] lub nieformalnych, w przypadku których działanie systemu jest opisywane programem naśladującym zachowanie się systemu, a przebieg symulacji odbywa się przy użyciu metody przeglądania działań lub metody planowania zdarzeń [4].

Zastosowanie metod nieformalnych do badania właściwości projektowanego RSPS związane jest dość dużym nakładem czasu, który należy poświęcić na przygotowanie odpowiedniego algorytmu, a następnie, na tej podstawie, programu. Jednak takie podejście wolne jest od ograniczeń związanych z zastosowaniem metod formalnych i dedykowanych dla nich środowisk. Badacz ma znacznie większą dowolność w zakresie definiowania struktury systemu, struktury węzłów, metody dostępu do medium komunikacyjnego oraz zadań realizowanych w systemie. Powstaje w ten sposób możliwość odwzorowania założonego poziomu szczegółowości pracy systemu i uwzględnienia jego istotnych elementów, które nie mieszczą się w dedykowanych dla metod formalnych środowiskach projektowych.

Właściwości RSPS są charakteryzowane zbiorem różnego rodzaju parametrów przedstawionych m.in. w pracach [5] i [6]. Wśród tych parametrów można wyróżnić czas opóźnienia transmisji danych ( $\tau_n$ ), który jest istotny, gdy system pracuje w czasie rzeczywistym i muszą być dotrzymane ograniczenia czasowe narzucone na zadania realizowane przez system. O wartości  $\tau_n$  w RSPS decyduje wiele czynników m.in. struktura systemu, struktura węzła, liczba zadań, częstość ich występowania [6]. Na wartość  $\tau_n$

mają także wpływ przesunięcia czasowe ( $\tau_p$ ) dotyczące uruchamiania poszczególnych, współpracujących ze sobą węzłów systemu.

W odróżnieniu od metodyki przeprowadzonych badań RSPS, których wyniki zaprezentowano w pracach [5] i [6], zrezygnowano z jednoczesnego uruchamiania w prowadzonych symulacjach wszystkich węzłów systemu oraz z prowadzenia symulacji przez określoną liczbę cykli zegara taktującego program symulacyjny. Wprowadzono ponadto losowy dobór  $\tau_p$ , a symulacje wykonywano w postaci wielokrotnie powtarzanych prób w połączeniu ze sprawdzeniem jednokrotnego wykonania wszystkich zadań systemu. RSPS w takim podejściu jest traktowany jako zbiór współpracujących ze sobą współużytkowanych zasobów.

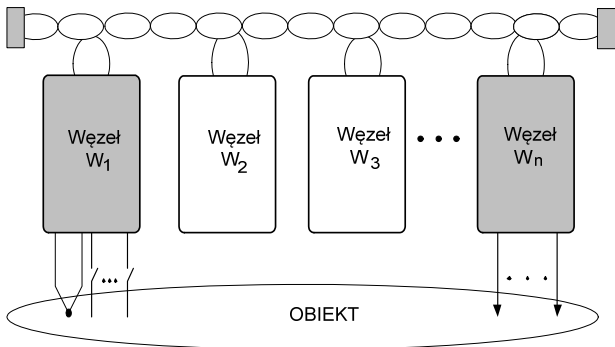
Jednoczesne uruchamianie w prowadzonych symulacjach wszystkich węzłów systemu stawia przed projektowanym systemem najostrejsze wymagania odnośnie wykorzystania współużytkowanych zasobów. Projektowanie RSPS na podstawie danych zebranych w tak prowadzonych symulacjach może prowadzić do jego niepotrzebnego przewymiarowania w zakresie doboru jego docelowych parametrów. Wprowadzenie losowego doboru  $\tau_p$  w uruchamianiu poszczególnych, współpracujących ze sobą węzłów systemu, pozwala na ocenę właściwości czasowych projektowanego RSPS w mniej krytycznych warunkach i w ten sposób lepsze dostosowanie właściwości projektowanego systemu do rzeczywistych potrzeb.

W artykule przedstawiono zastosowanie algorytmów symulacji zdarzeń dyskretnych [4] do określenia wpływu  $\tau_p$  na wartość  $\tau_n$  w RSPS. Opracowane algorytmy umożliwiły przeprowadzenie szeregu symulacji dla tej samej struktury systemu, w tym węzłów, przy stałych wartościach parametrów czasowych zadań realizowanych w węzłach i wybranych wartości przepustowości magistrali.

### Przyczyny powstawania opóźnień w systemie

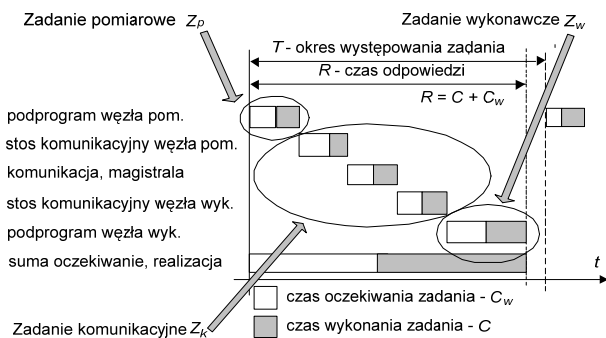
Zazwyczaj w RSPS do magistrali komunikacyjnej podłączonych jest określona liczba węzłów (rys. 1), w których wykonywanych jest po kilka podprogramów związanych z zadaniami pomiarowymi, wykonawczymi lub lokalnymi [5]. W takiej sytuacji, zanim dojdzie do przesłania danych magistralą, występuje tak zwany czas oczekiwania

na przydzielenie współużytkowanego zasobu, jakim w tym przypadku jest magistrala komunikacyjna. Podobna sytuacja występuje w każdym węźle pomiarowym oraz wykonawczym. Zanim zostanie przydzielony czas mikroprocesora na realizację odpowiedniego podprogramu, wystąpi czas oczekiwania na przydzielenie czasu mikroprocesora.



Rys. 1. Struktura RSPS

Zależności czasowe występujące w funkcjonowaniu systemu na skutek pojawiania się opóźnień wynikających z współużytkowania zasobów można przedstawić w postaci modelu zadania systemu (rys. 2) [6]. Zadaniem systemu nazywamy trójkę zadań, do której należy zadanie pomiarowe, zadanie komunikacyjne oraz zadanie wykonawcze. Zadanie pomiarowe i wykonawcze są realizowane w dwóch różnych węzłach systemu. Na pojedynczą realizację zadania systemu składa się realizacja tych trzech, powiązanych ze sobą zadań.



Rys. 2. Model zadania systemu

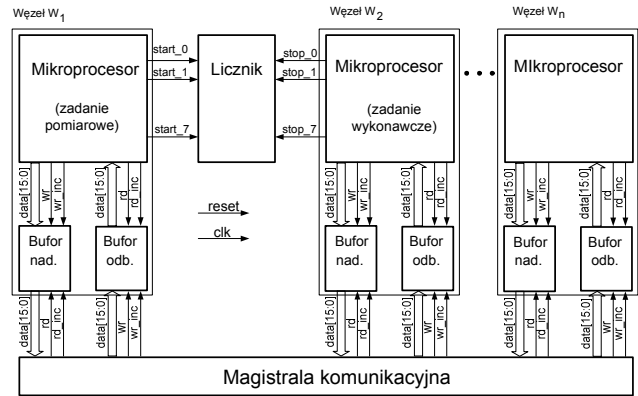
Każde z zadań składowych jest scharakteryzowane trzema parametrami:  $C$  (czas realizacji zadania),  $T$  (okres występowania zadania) i  $D$  (ograniczenie czasowe). Suma czasów realizacji poszczególnych zadań składowych daje czas realizacji zadania systemu. Suma czasów oczekiwania na przydzielenie dla zadania określonego zasobu systemu, daje czas oczekiwania zadania systemu w pojedynczej realizacji zadania. Istotnym parametrem zadania systemu jest czas odpowiedzi  $R$  systemu mierzony od momentu wyzwolenia zadania w węźle pomiarowym do momentu wykonania sterowania w węźle wykonawczym na podstawie danych przekazanych z węzła pomiarowego. Ze względu na to, iż w każdej realizacji zadania systemu czas oczekiwania na przydzielenie współużytkowanego zasobu dla zadań składowych będzie inny, czas  $R$  zawiera się w pewnych granicach wyznaczonych przez wartość minimalną ( $R_{min}$ ) i maksymalną ( $R_{max}$ ).

Jako opóźnienia transmisji danych  $\tau_o$  przyjęto opóźnienia związane z zadaniem komunikacyjnym, które to jest częścią składową zadania systemu.

## Modele strukturalne RSPS dla metody symulacji zdarzeń dyskretnych

Ze względu na wykorzystanie w badaniach dwóch różnych metod symulacji zdarzeń dyskretnych: metody przeglądania działań oraz metody planowania zdarzeń, dla każdej metody wykorzystano dedykowany dla niej model strukturalny [6] [7].

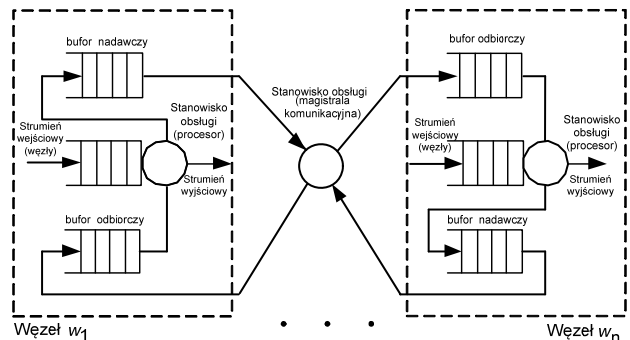
Punktem wyjścia do opracowania modelu strukturalnego RSPS dla metody przeglądania działań był model komunikacyjny takiego systemu [5]. Na jego podstawie opracowano model strukturalny (rys. 3).



Rys. 3. Model strukturalny rozproszonego systemu pomiarowo-sterującego dla metody przeglądanie działań

W celu zapewnienia uniwersalności modelu w zakresie realizowania różnych struktur oraz wykorzystywania różnych metod szeregowania zadań w poszczególnych blokach systemu [8], współpraca pomiędzy poszczególnymi blokami została zrealizowana podobnie, jak zachodzi to w rzeczywistych systemach mikroprocesorowych, czyli za pośrednictwem odpowiednich sygnałów. Wyróżniono magistralę danych, sygnały sterujące oraz sygnały pomocnicze związane z obsługą odpowiednich liczników. Takie rozwiązanie daje także możliwość niezależnej pracy poszczególnych składowych modelu, a także ich niezależne testowanie w fazie uruchamiania. W węzłach modelu odbywa się szeregowanie zadań przypisanych dla danego węzła.

Każdy z węzłów współpracuje z innymi wykorzystując odpowiednie sygnały sterujące i magistralę danych, a także przeznaczony dla niego bufor nadawczy i odbiorczy. W buforach następuje przechowywanie danych odebranych lub gotowych do przesłania. Z buforami nadawczymi i odbiorczymi współpracuje blok magistrali komunikacyjnej, w którym realizowany jest mechanizm przesłania danych właściwy dla zastosowanej metody dostępu do nośnika.



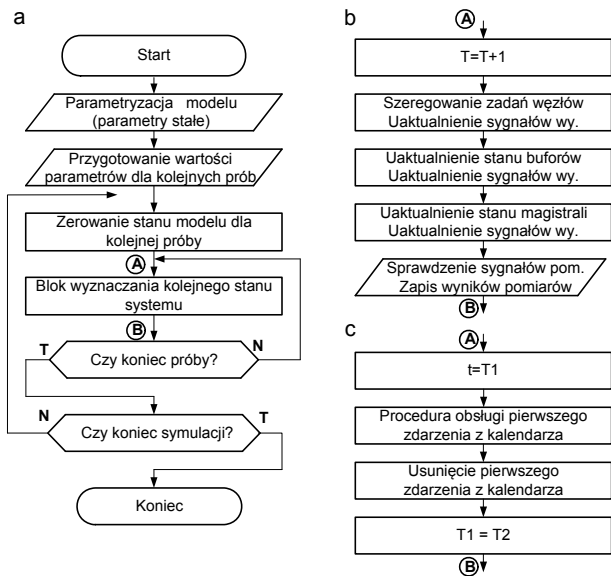
Rys. 4. Model strukturalny rozproszonego systemu pomiarowo-sterującego dla metody planowania zdarzeń

W metodzie planowania zdarzeń RSPS jest traktowany jako sieć stanowisk obsługi występujących we wszystkich węzłach systemu (rys. 4). W tym ujęciu, stanowiskiem obsługi jest także magistrała komunikacyjna systemu.

### Algorytm pracy symulatora

Na podstawie modeli strukturalnych opracowano algorytmy realizujące wszystkie zadania wykonywane w systemie.

Różnica pomiędzy algorytmem właściwym dla metody przeglądania działań i dla metody planowania zdarzeń występuje w bloku wyznaczenia kolejnego stanu systemu (rys. 5). Z tego powodu odpowiedni blok algorytmu pokazanego na rysunku 4 został zrealizowany odmiennie dla każdej metody.



Rys. 5. Algorytm pracy programu symulacyjnego (a), realizacja algorytmu bloku wyznaczenia kolejnego stanu systemu dla metody przeglądania działań (b) i metody planowania zdarzeń (c)

Po wprowadzeniu w bloku „parametryzacja modelu” wartości dla wszystkich parametrów wykorzystywanych podczas symulacji (liczba węzłów, parametry zadań węzłów i powiązań komunikacyjnych, ...) wykonywane jest wyznaczenie wartości parametrów używanych w kolejnych próbach. Na podstawie założonej wartości maksymalnej  $\tau_p$  następuje w sposób losowy poprzez wykorzystanie funkcji WhiteNoise() z środowiska LabWindows ustalenie chwili czasowej, w której każdy węzeł jest uruchamiany w kolejnych krokach algorytmu. Wybór funkcji WhiteNoise() podyktowany był przyjętym założeniem, że z założonego przedziału wszystkie wartości przesunięcia czasowego są jednakowo prawdopodobne. W dalszej kolejności realizowane jest zerowanie stanu systemu przed następnym krokiem oraz następuje wyznaczenie kolejnego stanu systemu. W zależności od przyjętej metody symulacji w bloku wyznaczenia stanu systemu realizowane są operacje właściwe dla bloków modelu strukturalnego (dla metody przeglądania działań) lub wykonywane są czynności odpowiednie dla zdarzeń w nim zapisanych (dla metody planowania zdarzeń). W kolejnych blokach algorytmu następuje sprawdzenie warunku końca próby oraz sprawdzenie warunku końca symulacji. Warunek końca próby ustalono jako jednorazowe zrealizowanie każdego zadania systemu. Za warunek końca symulacji przyjęto przeprowadzenie zadanej liczby prób (N).

### Parametry symulacji

W badaniach symulacyjnych był brany pod uwagę system o strukturze zawierającej 12 węzłów, realizujących 16 zadań systemu, składających się z zadań pomiarowych, zadań komunikacyjnych oraz zadań wykonawczych [6]. Parametry zadań pomiarowych oraz wykonawczych przedstawiono w tabeli nr 1, 2 oraz w tabeli nr 3. Wartości parametrów  $T$  (okres występowania) i  $C$  (czas realizacji) [5], charakteryzujące zadania lokalne, pomiarowe oraz wykonawcze, są wyrażone w cyklach  $clk$  zegara taktującego działanie programu symulacyjnego.

Tabela 1. Parametry zadań realizowanych w systemie – węzły pomiarowe

Nr zad. węzła pomiar.	Numer węzła (węzły pomiarowe)			
	1	2	3	4
	$T$ (okres występowania)/ $C$ (czas realizacji) (nr zadania systemu)			
1	520/60	520/60	520/60	520/60
2	720/80	720/80	720/80	720/80
3	1170/140 (1)	1170/140 (2)	1170/140 (3)	1170/140 (4)
4	2160/240 (5)	2160/240 (6)	2160/240 (7)	2160/240 (8)
5	3120/340 (9)	3120/340 (10)	3120/340 (11)	3120/340 (12)
6	4120/420 (13)	4120/420 (14)	4120/420 (15)	4120/420 (16)

Tabela 2. Parametry zadań realizowanych w systemie – węzły wykonawcze 5..8

Nr zad. węzła wyk.	Numer węzła (węzły wykonawcze)			
	5	6	7	8
	$T$ (okres występowania)/ $C$ (czas realizacji) (nr zadania systemu)			
1	520/60	520/60	520/60	520/60
2	720/80	720/80	720/80	720/80
3	1170/140 (1)	1170/140 (3)	2160/240 (5)	2160/240 (7)
4	1170/140 (2)	1170/140 (4)	2160/240 (6)	2160/240 (8)

Tabela 3. Parametry zadań realizowanych w systemie – węzły wykonawcze 9..12

Nr zad. węzła wyk.	Numer węzła (węzły wykonawcze)			
	9	10	11	12
	$T$ (okres występowania)/ $C$ (czas realizacji) (nr zadania systemu)			
1	520/60	520/60	520/60	520/60
2	720/80	720/80	720/80	720/80
3	3120/340 (9)	3120/340 (11)	4120/420 (13)	4120/420 (15)
4	3120/340 (10)	3120/340 (12)	4120/420 (14)	4120/420 (16)

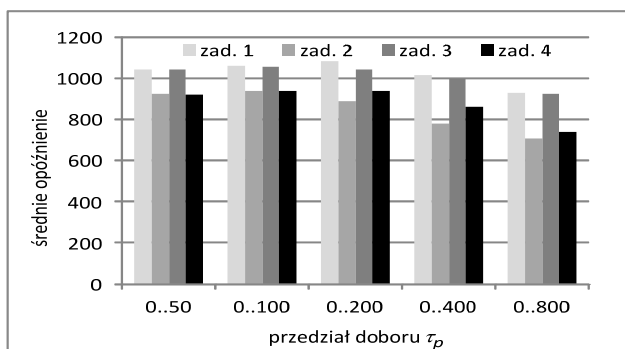
Z każdym zadaniem pomiarowym związane jest wykonanie zadania komunikacyjnego polegającego na przesłaniu danych przez magistralę systemu. Czas realizacji zadania komunikacyjnego (parametr  $C_k$ ) w zależności od założonej wartości współczynnika wykorzystania magistrali ( $u_m$ ) określono na 128 (dla  $u_m=0,96$ ) i 64 (dla  $u_m=0,48$ ) cykli. Założono również, że każdy z węzłów pomiarowych i wykonawczych realizuje dodatkowo dwa zadania lokalne nie związane z zadaniami systemu (zadania nr 1 i 2 w poszczególnych węzłach). Ponadto przyjęto, że w systemie obowiązuje metoda dostępu do nośnika *peer to peer* [2], a zadania w węzłach i te kierowane do transmisji są szeregowane wg metody *RM* (*Rate Monotonic*) bez wyłączenia [5].

Badania przeprowadzono dla następujących 5 przedziałów doboru przesunięcia czasowego w uruchamianiu poszczególnych węzłów systemu ( $\tau_p$ ): 0..50, 0..100, 0..200, 0..400, 0..800 clk. Każdy z tych przedziałów był badany dla 2 przypadków współczynnika wykorzystania magistrali wobec tego scenariusz symulacji obejmował 10 przypadków. W każdym z tych przypadków badania przeprowadzono dla N= 100 000 prób.

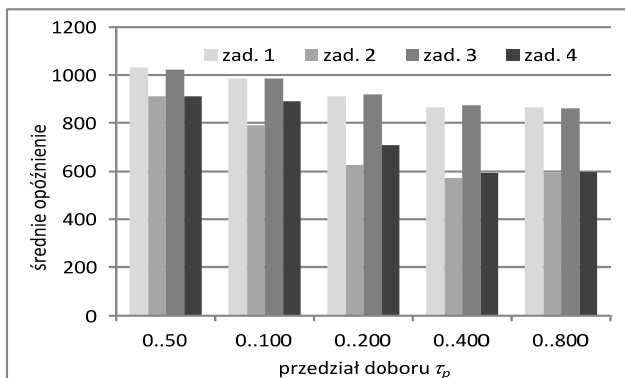
### Przykładowe wyniki badań

Wprowadzenie losowych wartości  $\tau_p$  ma wpływ na wartość  $\tau_o$  w sposób specyficzny dla poszczególnych zadań systemu. Za  $\tau_o$  przyjęto odcinek czasu, który upływa od momentu wpisania danych do przesłania do bufora nadawczego węzła. Zakończenie wyznaczania opóźnienia w transmisji danych ( $\tau_o$ ) następuje w momencie, w którym dane są odczytywane z bufora odbiorczego węzła.

Na rysunku 6 i 7 przedstawiono wartości średniego opóźnienia transmisji danych dla zadania systemu nr 1, 2, 3 i 4, które zostały uzyskane podczas symulacji przeprowadzonych dla współczynnika wykorzystania magistrali na poziomie 0,96 oraz 0,48 przy zastosowaniu metody planowania zdarzeń.



Rys. 6. Średnie opóźnienie transmisji danych dla zadania systemu nr 1, 2, 3, 4 dla współczynnika wykorzystania magistrali 0,96



Rys. 7. Średnie opóźnienie transmisji danych dla zadania nr 1, 2, 3, 4 dla współczynnika wykorzystania magistrali 0,48

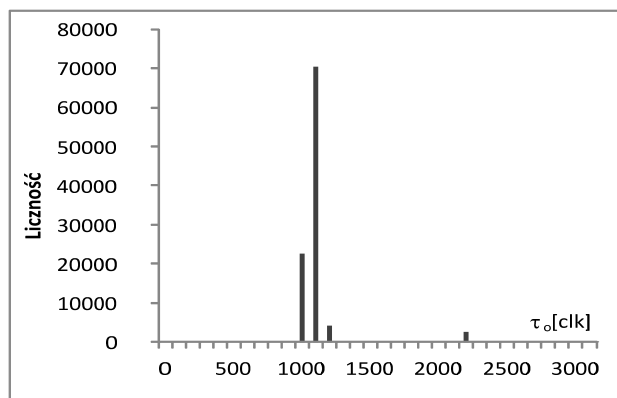
Zarówno w pierwszym jak i w drugim przypadku charakter zmian wartości średniego opóźnienia jest podobny dla zadania nr 1 i 3 oraz dla zadania 2 i 4. Wynika to z tego, że są one w podobny sposób przeznaczone do realizacji w węzłach systemu. Od strony węzłów pomiarowych są to zadania o najwyższym priorytecie z grupy zadań pomiarowych przeznaczonych do realizacji w tych węzłach, natomiast od strony wykonawczej zadania 1 i 3 mają w węzłach wykonawczych wyższy priorytet niż zadania 2 i 4. Dla zadania 1 i 3 oraz dla współczynnika wykorzystania magistrali 0,96 wartość opóźnienia

początkowo nieznacznie rośnie (od wartości 1045 clk do wartości 1085 clk) a następnie w kolejnych symulacjach nieznacznie maleje do wartości 930 clk. Dla zadania 2 i 4 charakter zmian jest podobny, ale rozpoczynają się one od wartości 925 clk i kończą na wartości 710 clk.

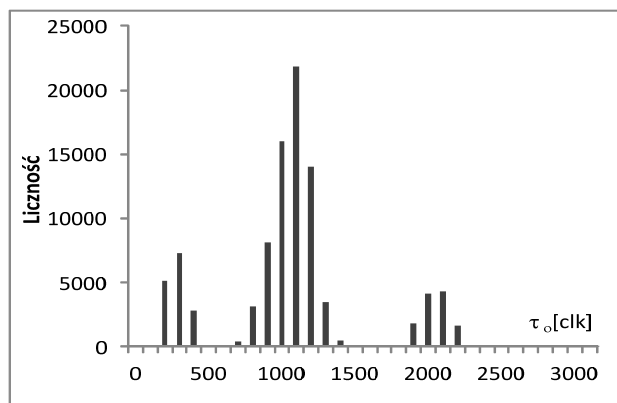
W przypadku współczynnika wykorzystania magistrali na poziomie 0,48, ten charakter zmian dla par zadań 1 i 3 oraz 2 i 4 jest utrzymany, jednak zmiany wartości średniego opóźnienia transmisji danych są większe. Dla zadań 1 i 3 zaczynają się one na wartości 1030 clk i kończą na wartości 860 clk, dla zadań 2 i 4 zaczynają się od wartości 910 clk a kończą na wartości 590 clk.

Gdyby porównać wyznaczone wartości średniego opóźnienia dla poszczególnych zadań osiągnięte dla współczynnika wykorzystania magistrali na poziomie 0,48 do wartości osiągniętych w symulacjach dla współczynnika wykorzystania magistrali na poziomie 0,96 można stwierdzić, że są one niższe. Wynikają z tego wnioski, że dla zadań 1, 2, 3, 4 zarówno rozłożenie startu węzłów w czasie jak i zmniejszenie współczynnika wykorzystania magistrali tworzy dla symulowanego systemu lepsze warunki do przesyłania danych pomiędzy węzłami.

Na rysunku 8 i 9 zaprezentowano przykładowe histogramy opóźnień  $\tau_o$  zadania systemu nr 1 w przypadku losowego doboru  $\tau_p$  z przedziału 0..100 (rys. 8) oraz z przedziału 0..400 (rys. 9) określonego w cyklach clk zegara taktującego działania modelu dla współczynnika wykorzystania magistrali na poziomie 0,96. Przedstawione histogramy zostały uzyskane dla metody planowania zdarzeń.



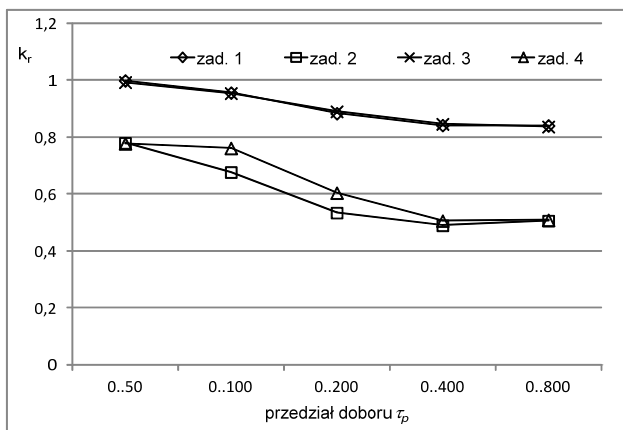
Rys. 8. Histogram opóźnień w transmisji danych zadania systemu nr 1 dla losowego doboru  $\tau_p$  z przedziału 0..100



Rys. 9. Histogram opóźnień w transmisji danych zadania systemu nr 1 dla losowego doboru  $\tau_p$  z przedziału 0..400

W pierwszym przypadku (rys. 8) sporadycznie uwiadcza się mechanizm blokowania danych do odczytu (opóźnienia w przedziale 2000..2200 c/k). W drugim przypadku (rys. 9) obserwuje się wzrost znaczenia mechanizmu blokowania danych do odczytu oraz pojawiają się opóźnienia dla tzw. najlepszego przypadku, w którym współużytkowane zasoby systemu nie są zajęte i bezpośrednio po zgłoszeniu zadania następuje jego realizacja (opóźnienia w przedziale 100..400 c/k).

Na rysunku 10 przedstawiono wartości współczynnika redukcji wartości średniego opóźnienia transmisji danych ( $k_r$ ) dla zadania systemu nr 1, 2, 3, 4.



Rys. 10. Wartość współczynnika  $k_r$  dla zadania systemu nr 1, 2, 3 i 4 dla współczynnika wykorzystania magistrali 0,48

Wartość współczynnika  $k_r$  jest wyznaczana jako iloraz wartości średniej  $\tau_o$  i wartości opóźnienia wyznaczonego w sytuacji, gdy nie występują przesunięcia czasowe w uruchamianiu poszczególnych węzłów systemu (dla  $\tau_p = 0$ ). Tak określony współczynnik  $k_r$  służy do porównania wyznaczonych podczas symulacji wartości średnich  $\tau_o$  z wartością opóźnienia w najgorszym przypadku, który występuje podczas pierwszej realizacji zadań systemu w sytuacji, gdy jednocześnie uruchamiane są wszystkie zadania systemu. Przedstawione na rysunku 10 wartości zostały uzyskane podczas symulacji przeprowadzonych dla współczynnika wykorzystania magistrali na poziomie 0,48 z użyciem metody planowania zdarzeń.

W przypadku zadań nr 1 i 3 można zauważyć spadek wartości współczynnika  $k_r$  do poziomu 0,84 dla doboru  $\tau_p$  z przedziału 0..800 c/k, natomiast dla zadania nr 2 i 4 spadek wartości współczynnika  $k_r$  jest większy i dla wartości  $\tau_p$  z zakresu 0..800 c/k osiąga wartość 0,5. Ponadto w przypadku doboru  $\tau_p$  z przedziału 0..50 c/k dla zadań 1 i 3 współczynnik  $k_r$  przyjmuje wartość 1, natomiast dla zadania

2 i 4 współczynnik  $k_r$  przyjmuje wartość 0,8. Oznacza to, że wprowadzenie losowych przesunięć czasowych w uruchamianiu poszczególnych węzłów z zakresu 0..50 c/k ma niewielki wpływ na wartości opóźnień dla zadań o najwyższych priorytetach.

### Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań symulacyjnych dotyczą metody planowania zdarzeń. Dla metody przeglądania działań osiągnięte wyniki były takie same. Zastosowanie dwóch metod symulacji zdarzeń dyskretnych umożliwiło weryfikację poprawności działania opracowanych programów symulacyjnych.

Przeprowadzone badania wskazują na potencjalną przydatność przedstawionych algorytmów do symulacji zdarzeń dyskretnych w celu określania właściwości czasowych RSPS. W podobny sposób można przeprowadzać badania RSPS dla innych typów zadań realizowanych w systemie, np. zadań związanych z przetwarzaniem regulowym [7]. Także losowy dobór wartości  $\tau_p$  można rozszerzyć na inne parametry opisujące zachowanie się systemu, takie jak np. zadania wykonywane przez węzły lub zadania realizowane za pośrednictwem magistrali systemu.

**Autor:** dr inż. Adam Markowski, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektroniki i Informatyki, ul. prof. Z. Szafrana 2 65-516 Zielona Góra, E-mail: [A.Markowski@ime.uz.zgora.pl](mailto:A.Markowski@ime.uz.zgora.pl)

### LITERATURA

- [1] Biłski P., Łukaszewski R., Czasowy model bloku przetwarzania danych w systemie pomiarowym, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2007, nr 9bis, 253-256
- [2] Łukaszewski R., Model przepływu informacji w rozproszonych systemach pomiarowych z wykorzystaniem sieci Petriego, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 2006, nr 7-8, 21-24
- [3] Bago M., Perić N., Marijan S., Modeling Bus Communication Protocols Using Timed Colored Petri Nets -The Controller Area Network Example,
- [4] Tyszer J., Symulacja cyfrowa, WNT, Warszawa 1990
- [5] Michta E., Markowski A., Assigning time parameters of distributed measurement control system, *Measurements models systems and design*, red. Korbicz J., Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2007, 95-119
- [6] Markowski A., Miczulski W., Badania symulacyjne rozproszonego systemu pomiarowo-sterującego, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2007, nr 9, 257-260
- [7] Markowski A., Miczulski W., Algorytm pracy symulatora bezprzewodowego rozproszonego systemu pomiarowo-sterującego z przetwarzaniem regulowym, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2008, nr 6, 359-361
- [8] Michta E., Scheduling systems, *Handbook of measuring system design*, ed. Sydenham P., Thom R., John Wiley & Sons, Chichester, 2005, 174-182