

# Wyznaczanie opóźnień transmisji danych w sieciowych systemach pomiarowo-sterujących

Adam Markowski\*

W artykule przedstawiono metodę badania opóźnień transmisji danych w sieciowych systemach pomiarowo-sterujących. Przedstawiono budowę modeli symulacyjnych sieciowych systemów pomiarowo-sterujących pracujących według zasady *master-slave* oraz *peer-to-peer*. Przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych dla systemu pracującego wg zasady *peer-to-peer*.

**Evaluation of data transmission delay in measuring and control system.** This article presents a method of determination of data transmission delay in measuring and control system. Building the simulation model for master-slave and peer-to-peer systems is described. Results of peer-to-peer system simulation are presented.

## Wprowadzenie

Projektowane i wdrażane współcześnie rozproszone systemy pomiarowo-sterujące o architekturze sieciowej, w których występują ograniczenia czasowe, są często systemami czasu rzeczywistego. Systemy czasu rzeczywistego są określane jako systemy, w których istotna jest nie tylko matematyczna poprawność przeprowadzanych obliczeń i otrzymanego wyniku, ale także czas, w jakim ten wynik staje się dostępny i czas, w jakim obliczenia są przeprowadzane. Stosując to określenie do sieciowych systemów pomiarowo-sterujących, interesuje nas nie tylko poprawność przesyłania w systemie danych, ale także czas, w jakim to przesyłanie jest realizowane.

Traktując sieciowy system pomiarowo-sterujący jako zbiór podłączonych do magistrali komunikacyjnej przetworników pomiarowych i elementów wykonawczych, które wymieniają między sobą dane, musimy już w fazie projektowania systemu znać odpowiedź na pytanie czy wszystkie zadania stawiane przed systemem, dla zadanego strumienia wiadomości w poszczególnych węzłach, dotrzymają swoich ograniczeń czasowych. Zadania stawiane przed systemem komunikacyjnym to przesyłanie wyników pomiarów wielkości mierzonych pomiędzy węzłami systemu.

Jednak stosowane dotychczas metody analizy sieciowych systemów pomiarowo-sterujących nie uwzględniają w wystarczającym stopniu znaczenia wszystkich komponentów sprzętowych, jak i programowych takiego systemu. Metoda najgorszego przypadku uwzględnienia najbardziej niekorzystną sumę czasu trwania wszystkich operacji cząstkowych występujących w przesyłaniu

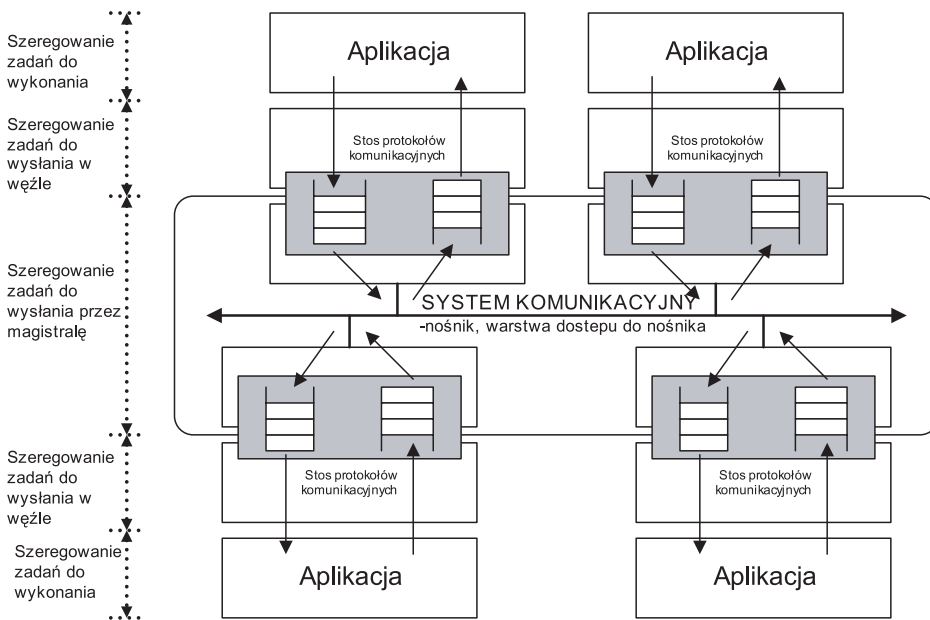
danych pomiarowych od węzła źródłowego do docelowego [1]. W praktyce takie opóźnienie jest mało prawdopodobne, a projektowanie systemu na podstawie tak oszacowanych opóźnień może prowadzić do jego znacznego przewymiarowania.

Metoda analizy oparta na szeregowaniu GRMS (*Generalised Rate Monotonic Scheduling*) szacuje tylko opóźnienia powstałe na współużytkowanej magistrali komunikacyjnej [2]. Pominięcie innych komponentów takich jak czas pracy aplikacji czy też czasy buforowania danych, czyni ją mało użyteczną.

Biorąc pod uwagę opóźnienia w przesyłaniu danych wnoszone przez wszystkie komponenty sprzętowe i programowe występujące w sieciowym systemie pomiarowo-sterującym, można wszystkie istotne miejsca, w których powstają te opóźnienia, przedstawić z wykorzystaniem modelu komunikacyjnego. Model uwzględnia opóźnienia związane z szeregowaniem zadań, występującym na poziomie aplikacji realizowanej przez węzeł. Model uwzględnia opóźnienia, które powstają podczas szeregowania realizowanego przez układy spełniające funkcje buforów komunikacyjnych. Ostatnia grupa opóźnień uwzględniona przez model to opóźnienia związane z szeregowaniem związanym z dostępem do medium komunikacyjnego.

Wykorzystując wspomniany powyżej model komunikacyjny, można zbudować model symulacyjny sieciowego systemu pomiarowo-sterującego. Model umożliwia, dla zadanego strumienia wiadomości w poszczególnych węzłach, wyznaczenie histogramu opóźnień dla każdego zadania komunikacyjnego postawionego przed systemem. W ten sposób model pozwala na określenie, już na etapie projektowania, rozmiaru opóźnień w transmisji

\* Mgr inż. Adam Markowski – Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektrycznej



Rys. 1. Model komunikacyjny sieciowego systemu pomiarowo-sterującego

## Model komunikacyjny sieciowego systemu pomiarowo-sterującego

Uwzględnienie wszystkich współużytkowanych elementów w strukturze sieciowego systemu pomiarowo-sterującego jakimi są mikroprocesory w węzłach systemu, buforory danych oraz magistrala komunikacyjna prowadzi do modelu komunikacyjnego takiego systemu [3]. W elementach tych powstają najistotniejsze opóźnienia, występujące podczas przesyłania danych pomiędzy

danych i sprawdzenie w ten sposób dotrzymania ograniczeń czasowych nałożonych na każde zadanie.

Różnorodność metod stosowanych do wyznaczenia węzłom czasu dostępu do magistrali komunikacyjnej nie pozwala na zastosowanie jednego uniwersalnego modelu symulacyjnego. Specyfika zastosowanego rozwiązania musi być uwzględniona w procesie symulacji. Przedstawione w artykule modele symulacyjne uwzględniają dwie metody stosowane do wyznaczania węzłom systemu czasu dostępu do medium komunikacyjnego. W metodzie *peer-to-peer* dostęp do medium komunikacyjnego jest rozstrzygany na podstawie nadanych przesyłanym danym określonych priorytetów, natomiast w metodzie *master-slave* wymagane jest istnienie dodatkowego węzła o statusie *master*, który według określonego scenariusza przeprowadza wymiany danych pomiędzy węzłami systemu.

dzy węzłami w sieciowym systemie pomiarowo-sterującym, ponieważ ze względu na to, że są wnoszone przez współużytkowane komponenty systemu mają charakter rozkładów (rys. 1).

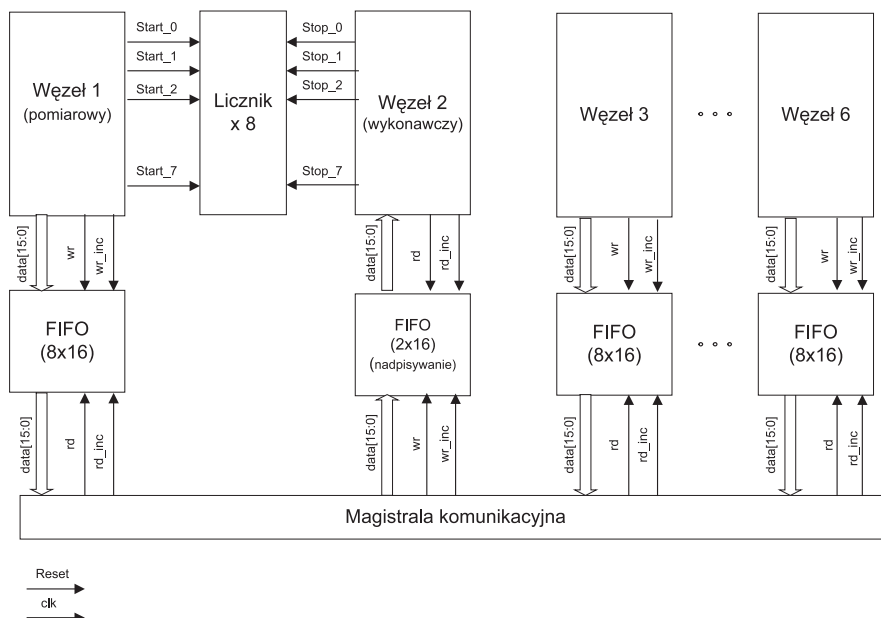
Model uwzględnia opóźnienia związane z wykonaniem i szeregowaniem zadań, które występują na poziomie aplikacji realizowanej przez węzeł. Jest to efekt współużytkowania mikroprocesora węzła. Może to być na przykład związane z równoczesnym pomiarem kilku wielkości lub równoczesną obsługą kilku podprogramów.

Model uwzględnia opóźnienia związane z buforowaniem i szeregowaniem danych, które powstają podczas oczekiwania danych przed wysłaniem ich na magistralę komunikacyjną. Oba wymienione szeregowania są realizowane niezależnie w poszczególnych węzłach.

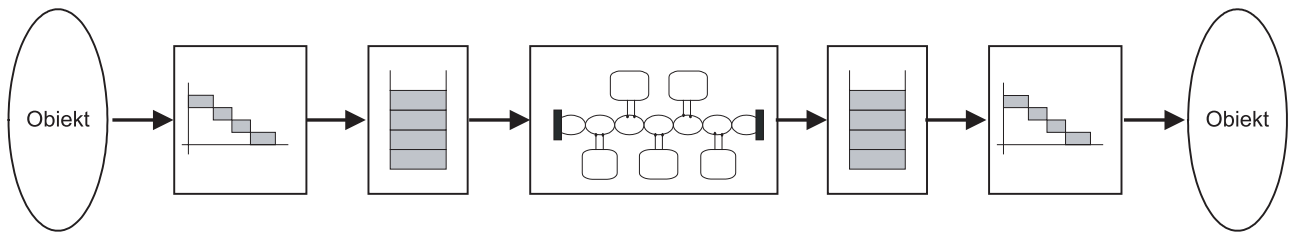
Trzecie i ostatnie opóźnienie uwzględnione przez

model jest związane z wykonaniem przesłania danych pomiarowych i ich szeregowaniem realizowanym przy uzyskaniu dostępu do medium komunikacyjnego. To szeregowanie dotyczy wszystkich węzłów. Typ zastosowanego na poszczególnych etapach szeregowania jest zależny od wykorzystywanego w danym wypadku standardu sieci przemysłowej.

Przedstawiony model komunikacyjny może posłużyć do opracowania ogólnej metodyki projektowania sieciowych systemów pomiarowo-sterujących. Praktyczna realizacja w postaci modelu symulacyjnego będzie wyko-



Rys. 2. Model symulacyjny systemu *peer-to-peer*



Rys. 3. Rozwinięcie modelu symulacyjnego dla pojedynczego zadania komunikacyjnego w systemie *peer-to-peer*

rzystywać elementy teorii szeregowania zadań stosowane głównie do projektowania systemów komputerowych czasu rzeczywistego. Obszary tych zastosowań zaznaczono na rys. 1.

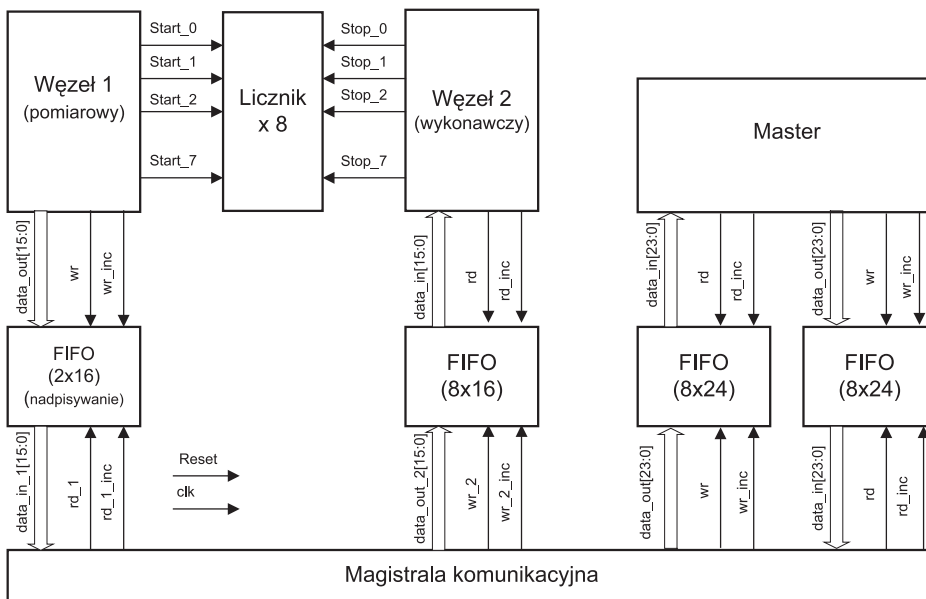
### Model symulacyjny dla systemu *peer-to-peer*

Wykorzystując przedstawiony na rys. 1 model komunikacyjny, można zbudować model symulacyjny sieciowego systemu pomiarowo-sterującego pracującego według zasady *peer-to-peer*. Przedstawiony w tym rozdziale model został zestawiony w taki sposób, aby umożliwić pomiar opóźnień jakie powstają podczas przesyłania danych z węzła pomiarowego do węzła wykonawczego dla wybranego zadania komunikacyjnego. Model zawiera sześć węzłów (rys. 2): węzeł pomiarowy, w którym powstają dane do przesłania, i węzeł wykonawczy, w którym te dane są wykorzystane, oraz cztery węzły określające wykorzystanie pasma magistrali komunikacyjnej. Jedno z zadań współużytkowanego mikroprocesora węzła pomiarowego związane z pozyskaniem danych wystawia także impuls rozpoczynający pomiar opóźnienia. Odpowiadające mu jedno z zadań mikroprocesora węzła wykonawczego, po otrzymaniu odpowiednich danych i ich wykorzystaniu, wystawia impuls kończący pomiar opóźnienia.

Wyniki kolejnych pomiarów opóźnień są zapisywane na plikach w celu dalszej analizy.

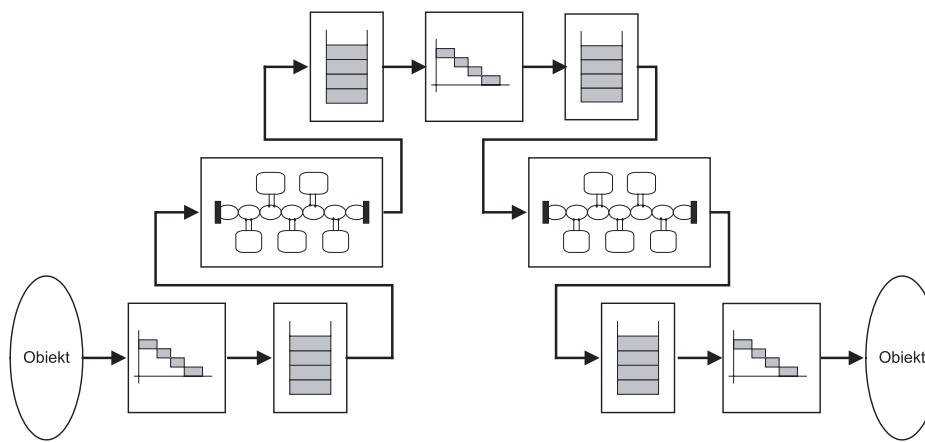
Kolejne bloki modelu symulacyjnego będące źródłami zmiennych opóźnień dla pojedynczego zadania komunikacyjnego w systemie *peer-to-peer* przedstawione są na rys. 3. Pierwszy współużytkowany element, przez który przechodzą dane, to mikroprocesor węzła źródłowego, który może wykonywać kilka zadań czy też podprogramów i tylko jedno z nich jest związane z interesującym nas zadaniem komunikacyjnym. Dane po odczytaniu np. z przetwornika A/C i ewentualnej obróbce są umieszczane w buforze nadawczym węzła źródłowego, w którym mogą być równocześnie umieszczone dane przynależne do innych zadań komunikacyjnych. W buforze komunikacyjnym dane oczekują na przesłanie przez blok magistrali komunikacyjnej, która dokonując arbitrażu decyduje o przesunięciu z odpowiednim opóźnieniem wynikającym z parametrów magistrali, danych z bufora nadawczego węzła pomiarowego do bufora odbiorczego węzła wykonawczego. Ostatni element to współużytkowany mikroprocesor węzła docelowego, którego jedno z zadań pobiera dane z bufora odbiorczego i na ich podstawie wykonuje odpowiednie sterowanie.

### Model symulacyjny dla systemu *master-slave*



Rys. 4. Model symulacyjny systemu *master-slave* w systemie *master-slave*

Wykorzystując przedstawiony na rys. 1 model komunikacyjny, można zbudować także model symulacyjny sieciowego systemu pomiarowo-sterującego umożliwiający pomiar opóźnień jakie powstają podczas przesyłania danych pomiarowych z węzła pomiarowego do węzła wykonawczego w przypadku zastosowania zasady dostępu do medium komunikacyjnego *master-slave*. Model zawiera trzy węzły (rys. 4) – dwa węzły o statusie *slave*: pomiarowy i wykonawczy oraz jeden węzeł o statusie *master*, który realizuje scenariusz wymian danych pomiędzy węzłami systemu.



Rys. 5. Rozwinięcie modelu symulacyjnego dla pojedynczego zadania komunikacyjnego w systemie *master-slave*

Kolejne bloki modelu symulacyjnego będące źródłami zmiennych opóźnień dla pojedynczego zadania komunikacyjnego w systemie *master-slave* przedstawione są na rys. 5. W odróżnieniu od systemu *peer-to-peer* dane dwukrotnie są przesyłane przez magistralę komunikacyjną oraz są przesuwane przez bufor odbiorczy i nadawczy węzła *master* oraz mikroprocesor tego węzła.

### Przykładowe wyniki symulacji

Przedstawione wyniki symulacji dotyczą systemu *peer-to-peer* składającego się z 24 węzłów: 12 węzłów pomiarowych i 12 węzłów wykonawczych. Każdy węzeł wykonuje cztery zadania. Każde z nich ma inny czas realizacji i okres występowania. Każde zadanie węzła pomiarowego jest związane z wykonaniem podprogramu pomiarowego i zapisaniem danych pomiarowych do bufora nadawczego węzła. Każde zadanie węzła wykonawczego jest związane z odczytem danych pomiarowych z bufora odbiorczego węzła i wykonaniem na ich podstawie odpowiedniego podprogramu sterowania. Zadania w węzłach są szeregowane wg zasady RM (*Rate Monotonic*). Pary zadań węzłów pomiarowych i wykonawczych tworzą 48 zadań komunikacyjnych, którym przydzielono priorytety również według zasady RM. Gdy okresy zadań pomiarowych są równe o wartości priorytetu decyduje nr porządkowy węzła.

Parametryzacja pracy poszczególnych węzłów jest zawarta w tabeli 1. Każde zadanie realizowane w węźle jest scharakteryzowane przez dwa parametry: czas

realizacji C oraz okres występowania T. Wykorzystanie mikroprocesorów w poszczególnych węzłach  $\mu$  jest na podobnym poziomie. Parametry są wyrażone w liczbach okresów zegara taktującego model.

Symulacje przeprowadzono dla dwóch przypadków: w pierwszym założono równość okresów występowania i czasu realizacji zadania pomiarowego i wykonawczego prznaleźnego do określonego zadania komunikacyjnego, w drugim – okres

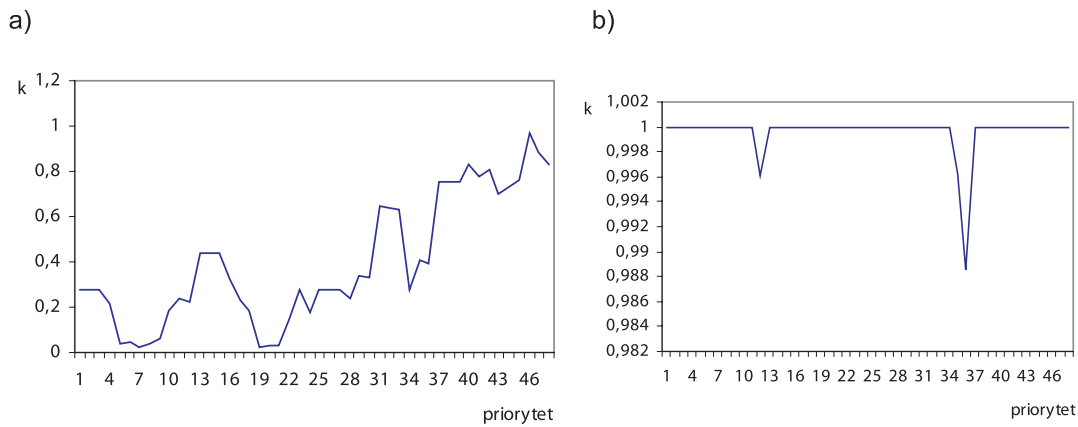
oraz czas realizacji zadania wykonawczego skrócono 10-krotnie. Na rys. 6 przedstawiono wykres wartości współczynnika przejścia zadania komunikacyjnego k w funkcji wartości priorytetu dla obu przypadków – a) okresy równe, b) okresy różne. Współczynnik przejścia k jest określony jako stosunek udanych przesłań danych przez system do całkowitej liczby danych wygenerowanych w zadaniu pomiarowym i jest określany dla każdego zadania komunikacyjnego. Za udane przesłania uważa się przesłania, w których dane wygenerowane w węźle pomiarowym są odczytywane w buforze odbiorczym węzła wykonawczego jeszcze przed ich nadpisaniem przez dane należące do innego zadania komunikacyjnego. Jak widać z wykresów w przypadku równości okresów występowania zadań pomiarowego i wykonawczego część danych ulega nadpisywaniu w systemie i nie trafia do zadania wykonawczego węzła docelowego. Przy znacznym zmniejszeniu okresu występowania zadania wykonawczego w węźle docelowym prawie wszystkie dane wygenerowane w węzłach pomiarowych są poprawnie odczytywane w węzłach wykonawczych. Jak widać z przedstawionych wykresów model umożliwia sprawdzenie, czy system obsłuży wszystkie zadania komunikacyjne nie gubiąc żadnego z nich, co jest podstawą dalszych prac nad projektowanym systemem.

Model umożliwia także zbadanie histogramu opóźnień przy przesyłaniu danych pomiarowych z węzła pomiarowego do docelowego (rys. 7). Jest to czas od momentu wpisania danych pomiarowych w węzele pomiarowym do bufora węzła, do momentu odczytania ich z bufora odbiornika przez węzeł wykonawczy wyrażony w liczbach okresów zegara taktującego model.

Tabela 1. Parametry zadań węzłów

	Węzeł pomiarowy			Węzeł wykonawczy (1)			Węzeł wykonawczy (2)				
	T	C	C/T	T	C	C/T	T	C	C/T		
1	1920	290	0,15	1	1920	290	0,15	1	192	29	0,15
2	3080	480	0,16	2	3080	480	0,16	2	308	48	0,16
3	3830	950	0,25	3	3830	950	0,25	3	383	95	0,25
4	5400	1150	0,21	4	5400	1150	0,21	4	540	115	0,21
	$\mu = 0,77$			$\mu = 0,77$			$\mu = 0,77$				





**Rys. 6.** Współczynnik przejścia zadania komunikacyjnego w funkcji priorytetu zadania, a) okresy występowania zadania pomiarowego i wykonawczego równe, b) okres występowania zadania pomiarowego 10-krotnie dłuższy od okresu występowania zadania wykonawczego

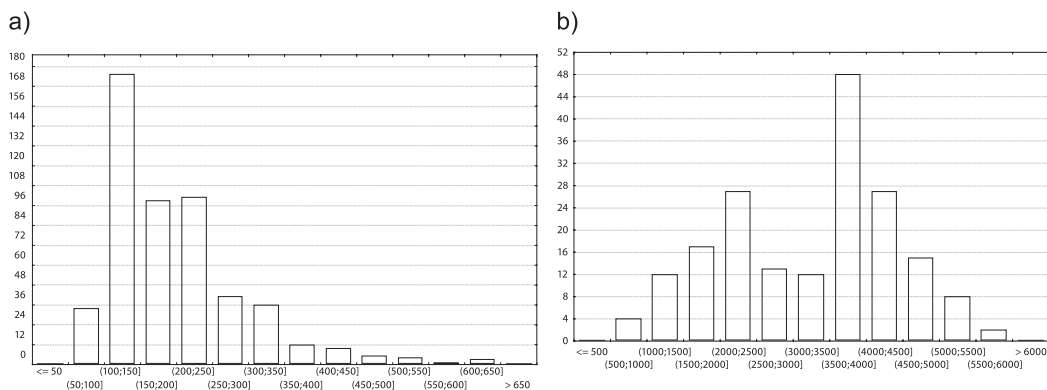
Poniżej zamieszczono przykładowe histogramy opóźnień zadania komunikacyjnego o najwyższym i najniższym priorytecie (rys. 7). Z przeprowadzonych symulacji wynika, że kształt histogramu jest zależny od priorytetu zadania komunikacyjnego i dla zadania o najwyższym priorytecie może przyjąć kształt jednomodalny skrajnie asymetryczny, natomiast dla zadań o najniższych priorytetach kształt histogramu może cechować się wielomodalnością.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono wykorzystanie modelu symulacyjnego sieciowego systemu pomiarowo-sterującego w celu określenia poprawności systemu i wyznaczenia histogramu opóźnień występujących podczas przesyłania danych pomiarowych przez system. Przedstawiony model uwzględnia nie tylko opóźnienia cząstkowe wnoszone przez elementy programowe i sprzętowe systemu, ale także opóźnienia powstałe w wyniku współużytkowania określonych elementów systemu. Informacja na temat poprawności systemu oraz histogramów opóźnień może być przydatna projektantom systemów. W najbliższym czasie planuje się zbudować modele symulacyjne uwzględniające bardziej zaawansowane metody szeregowania zadań w buforach danych pomiarowych (DM, EDF).

## Bibliografia

- [1] Kwiecień A., Bigewski Z., Mrówka Z.: *Analiza czasu najgorszego przypadku w sieciach przemysłowych*; Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria INFORMATYKA, z. 36, Gliwice, 1999, s. 473–484.
- [2] Werewka J., Żaba S.: *Szeregowanie wiadomości w rozproszonych systemach czasu rzeczywistego wykorzystujących magistrale miejscowe*; Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji, tom 45, z.1, Kraków 1999, s. 25–50.
- [3] Michta E.: *Modele komunikacyjne sieciowego systemu pomiarowo-sterującego*; Wydawnictwo Politechniki Zielonogórskiej, Zielona Góra, 2000.
- [4] Markowski A., Michta E.: *Analiza dotrzymania warunków czasu rzeczywistego w rozproszonych systemach pomiarowo-kontrolnych*; Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i w Przemśle – SP'2000, 14-15 czerwca 2002, Zielona Góra.
- [5] Markowski A., Furmankiewicz L.: *Integracja sieci przemysłowych z siecią Profibus DP*; Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i w Przemśle – SP'02, 14-15 czerwca 2002, Zielona Góra.



**Rys. 7.** Histogramy opóźnień zadań komunikacyjnych a) najwyższy priorytet, b) najniższy priorytet