

Uniwersytet Zielonogórski
Wydział Elektrotechniki Informatyki i Telekomunikacji

Praca Doktorska

Model symulacyjny rozproszonego systemu
pomiarowo - sterującego

mgr inż. Adam Markowski

Promotor: dr hab. inż. Wiesław Miczulski, prof. UZ

Zielona Góra 2006

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	4
1.1. Wprowadzenie	4
1.2. Klasyfikacja systemów pomiarowych	5
1.3. Architektury rozproszonych systemów pomiarowo – sterujących	5
1.4. Przyczyny powstawania opóźnień w systemie	7
1.5. Parametry charakteryzujące właściwości rozproszonych systemów pomiarowo – sterujących	10
1.6. Cel i teza pracy	13
1.7. Zawartość rozprawy	13
2. METODY ANALIZY SYSTEMÓW POMIAROWO – STERUJĄCYCH	14
2.1. Wprowadzenie	14
2.1. Metody probabilistyczne i ich symulacyjne kontynuacje	15
2.2.1. Metody analizy systemów komputerowych	15
2.2.2. Badania opóźnień w transmisji danych w systemach operacyjnych czasu rzeczywistego	16
2.3. Metody deterministyczne	18
2.3.1. Wyznaczanie maksymalnego czasu cyklu sieci	18
2.3.2. Wyznaczanie czasu reakcji systemu z wykorzystaniem modelu komunikacyjnego systemu	19
2.3.3. Sprawdzenie dotrzymania ograniczeń czasowych na magistralach systemu	19
2.4. Badania symulacyjne magistral systemu	21
2.5. Podsumowanie	21
3. MODEL KOMUNIKACYJNY ROZPROSZONEGO SYSTEMU POMIAROWO – STERUJĄCEGO	23
3.1. Model komunikacyjny	23
3.2. Model zadania systemu	25
3.3. Planowanie wykonania zadań	27
3.3.1. Zasady przydzielania priorytetów zadaniom	27
3.3.2. Systemy z wywłaszczaniem i bez wywłaszczania	27
3.3.3. Szeregowanie zadań metodą RM ze stałym przypisaniem priorytetu z wywłaszczaniem zadań	28
3.3.4. Szeregowanie zadań metodą RM ze stałym przypisaniem priorytetu bez wywłaszczania zadań	29
3.3.5. Szeregowanie zadań metodą RM – czas odpowiedzi w systemach z wywłaszczaniem zadań	30
3.3.6. Szeregowanie zadań metodą RM – czas odpowiedzi w systemach bez wywłaszczania zadań	31
3.4. Podsumowanie	32
4. METODY SYMULACJI	33
4.1. Wprowadzenie	33
4.2. Metoda przeglądania działań	34
4.3. Metoda planowania zdarzeń	37

5. MODELE SYMULACYJNE ROZPROSZONEGO SYSTEMU POMIAROWO – STERUJĄCEGO	39
5.1. Wprowadzenie	39
5.2. Model symulacyjny oparty o metodę przeglądania działań	39
5.2.1. Model strukturalny	39
5.2.2. Opis bloków modelu	40
5.2.3. Model symulacyjny dla pojedynczego zadania	44
5.2.4. Algorytm pracy programu realizującego model symulacyjny metodą przeglądania działań	45
5.2.5. Algorytm pracy programu realizującego szeregowanie zadań węzła	46
5.2.6. Parametryzacja modelu systemu	48
5.2.7. Parametry wynikowe symulacji	48
5.3. Model symulacyjny oparty o metodę planowania zdarzeń	53
5.3.1. Model strukturalny	53
5.3.2. Algorytm pracy programu realizującego model symulacyjny metodą planowania zdarzeń	54
5.4. Realizacja modeli symulacyjnych	57
5.5. Podsumowanie	59
6. OCENA POPRAWNOŚCI DZIAŁANIA MODELI SYMULACYJNYCH	60
6.1. Metoda analityczna	60
6.1.1. Model analityczny	60
6.1.2. Wyniki obliczeń	61
6.1.3. Podsumowanie	65
6.2. Metoda doświadczalna	66
6.2.1. Model fizyczny RSPS	66
6.2.2. Wyniki badań	72
6.2.3. Podsumowanie	74
7. BADANIA SYMULACYJNE ROZPROSZONYCH SYSTEMÓW POMIAROWO – STERUJĄCYCH	75
7.1. Program badań	75
7.2. Wyniki badań	75
7.2.1. Wpływ liczby zadań systemu na właściwości rozproszonego systemu pomiarowo – sterującego	75
7.2.2. Wpływ struktury systemu i struktury węzłów na właściwości rozproszonego systemu pomiarowo – sterującego	81
7.3. Podsumowanie	93
8. POSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	95
9. LITERATURA	98

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Dokonująca się w ostatnich latach ewolucja w zakresie struktury rozproszonych systemów pomiarowo - sterujących oraz dostępność zaawansowanych rozwiązań dedykowanych układów elektronicznych do realizacji protokołów komunikacyjnych sieci przemysłowych, stwarza dogodne warunki do realizacji sieciowych systemów pomiarowo-sterujących.

Wspomniana ewolucja polega na przejściu od rozwiązań scentralizowanych do rozwiązań rozproszonych i otwartych. Elementami takich systemów są coraz częściej inteligentne urządzenia (węzły) bazujące na mikroprocesorach. Istotną cechą takiego urządzenia jest zdolność do przetwarzania danych i dwukierunkowej cyfrowej wymiany danych pomiędzy urządzeniami tworzącymi system pomiarowo – sterujący. Ciągły rozwój elektroniki i informatyki oraz rosnące wymagania związane z jakością, niezawodnością, ochroną środowiska, elastycznością produkcji, a także stałym dążeniem do wzrostu wydajności i obniżania kosztów produkcji są najważniejszymi czynnikami stymulującymi tę ewolucję. Wszystko to zarazem wpływa na wzrost produkcji inteligentnych węzłów takich systemów. W ostatnich latach ranga systemów pomiarowo – sterujących znacznie wzrosła, ponieważ poza bezpośrednim oddziaływaniem na obiekt stanowią one podstawowe źródło danych dla wielu aplikacji informatycznych takich jak systemy wizualizacyjne, systemy diagnostyczne, systemy ekspertowe. W konsekwencji specjalnego znaczenia nabiera możliwość wystąpienia sytuacji, w której w systemie następuje utrata części danych, co ma na przykład bezpośredni wpływ na jakość bazy wiedzy w systemach ekspertowych [MarMicSzu05].

Jednym z częściej spotykanych wymagań stawianych systemom pomiarowo – sterującym jest dotrzymanie ograniczeń czasowych przez zadania wykonywane w systemie. Podstawowe zadania wykonywane w systemie, to przetwarzanie i przesyłanie danych pomiarowych pomiędzy węzłami systemu. Analiza dotrzymania ograniczeń czasowych powinna być przeprowadzona już na etapie projektowania systemu. Ewolucja systemów pomiarowo - sterujących ze struktury multiplekserowej do struktury sieciowej stworzyła zupełnie nową sytuację w ich projektowaniu, wynikającą ze zmiany sposobu przesyłania informacji z powszechnie stosowanej transmisji analogowej na cyfrową transmisję szeregową. Także budowa oprogramowania poszczególnych węzłów systemu zorientowana na wykorzystanie procesora przez różne podprogramy wymaga uwzględnienia w analizie dotrzymania ograniczeń czasowych. Do przeprowadzenia oceny dotrzymania ograniczeń czasowych nie wystarczy tylko znajomość parametrów komunikacyjnych (np. przepustowości sieci, obciążenia sieci, efektywności komunikacyjnej) i opracowanie analitycznych zależności wiążących wymagania stawiane projektowanym systemom z parametrami komunikacyjnymi danej sieci przemysłowej. W celu poprawnego oszacowania dotrzymania ograniczeń czasowych przez zadania w systemie, należy na system spojrzeć jak na zespół współużytkowanych i równocześnie współpracujących ze sobą elementów. Także pod tym kątem należy przygotowywać narzędzia wspomagające projektowanie wymienionych systemów.

Przedmiotem pracy są zagadnienia dotrzymania ograniczeń czasowych przez zadania systemu pomiarowo – sterującego oraz sprawdzenia stopnia utarty danych w tym systemie. Przeprowadzone w obu przypadkach analizy uwzględniają aspekty współużytkowania zasobów i współpracy poszczególnych elementów systemu. Z zagadnieniem dotrzymania ograniczeń czasowych przez zadania systemu nierozzerwalnie łączy się wyznaczanie opóźnień jakie powstają w transmisji danych pomiarowych od miejsca ich powstania do miejsca ich wykorzystania w systemie.

1.2. Klasyfikacja systemów pomiarowych

Istnieje wiele kryteriów podziału systemów pomiarowych. Ze względu na przeznaczenie możemy wyróżnić następujące klasy systemów pomiarowych: badawcze, pomiarowo – sterujące i pomiarowo – diagnostyczne [Mem89].

Biorąc pod uwagę sposób integracji systemu z obiektem lub procesem technologicznym każdy z tych systemów może występować jako system skupiony lub rozproszony. Systemem rozproszonym jest system, którego elementy (węzły) są rozmieszczone terytorialnie, połączone ze sobą i zdolne do wzajemnej wymiany informacji [Bar04].

Systemy pomiarowe badawcze stosuje się najczęściej w pomiarach naukowych i są one najczęściej systemami skupionymi. Systemy pomiarowo - diagnostyczne wykorzystuje się do wykrywania, lokalizacji oraz przewidywania uszkodzeń elementów nadzorowanego obiektu lub procesu technologicznego i są one najczęściej systemami rozproszonymi.

Systemy pomiarowo – sterujące, które są niezbędne do prawidłowego funkcjonowania obiektów i procesów technologicznych stanowią najliczniejszą i dynamicznie rozwijającą się grupę systemów pomiarowych i najczęściej występują jako systemy rozproszone.

Biorąc pod uwagę rodzaj medium komunikacyjnego systemy pomiarowe można podzielić na: systemy przewodowe (media: kable, światłowody) i bezprzewodowe (media: fale podczerwone, fale radiowe) [Bar04].

Uwzględniając ewolucję w zakresie struktury w przewodowych systemach pomiarowych można wyróżnić systemy o architekturze multiplekserowej, sieciowej lub mieszanej. W wielu przypadkach realizacja funkcji pomiarowo – sterującej i pomiarowo – diagnostycznej w systemach o strukturze sieciowej lub mieszanej może być realizowana z wykorzystaniem tej samej infrastruktury programowo – sprzętowej obejmującej programy użytkowe, systemy operacyjne, nośniki, protokoły komunikacyjne i urządzenia sieciowe [Mic00].

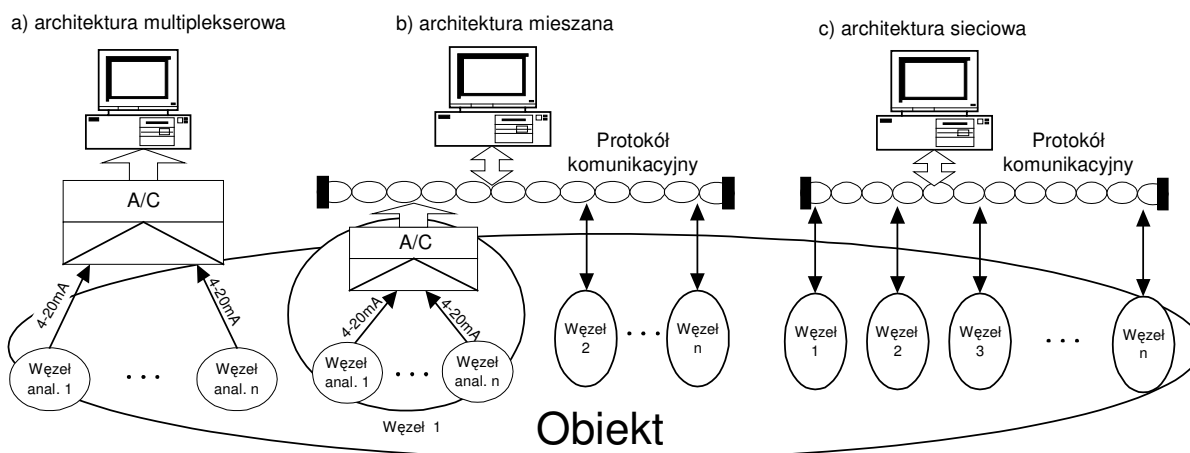
W przypadku systemów o architekturze sieciowej jednym z ich istotnych elementów jest infrastruktura komunikacyjna wykorzystująca cyfrową transmisję szeregową zwana siecią przemysłową (ang. *Industrial Network*) [Mic00]. Równoważnymi pojęciami używanymi w publikacjach są sieci miejscowe lub sieci polowe (ang. *Fildbus*) [Sac98]. Infrastruktura komunikacyjna oznacza środki programowe i sprzętowe niezbędne do zbudowania systemu komunikacyjnego. Podstawą podziału sieci przemysłowych jest ich struktura komunikacyjna obejmująca topologię magistralową i metody dostępu do nośnika. Topologia magistralowa jest obecnie dominującą topologią stosowaną w sieciach przemysłowych, które zazwyczaj tworzą infrastrukturę komunikacyjną rozproszonego systemu. Niski koszt okablowania sieci przemysłowej o takiej topologii, prostota jej wykonania, możliwość rozbudowy i dobre parametry wydajnościowe stanowią wystarczające uzasadnienie jej popularności. W sieciach przemysłowych o topologii magistralowej możliwe jest stosowanie protokołów komunikacyjnych wykorzystujących różne metody dostępu do nośnika, wśród których należy wymienić: *master - slave*, *token passing*, *peer to peer CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)*, *peer to peer CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)*, *PDK (producent-dystrybutor-konsument)* [Mic00][WerZabDrw97][Naw02][LesSwi02][Win97].

W dalszej części pracy rozpatruje się przewodowe rozproszone systemy pomiarowo – sterujące (RSPS) o architekturze sieciowej, które jako swoją infrastrukturę komunikacyjną wykorzystują magistralowe sieci przemysłowe o dostępie *master – slave* oraz *peer to peer*.

1.3. Architektury rozproszonych systemów pomiarowo- sterujących

Wprowadzenie w połowie lat 80-tych standardu cyfrowego, szeregowego interfejsu komunikacyjnego RS-485 i opracowanie na początku lat 90-tych protokołów

komunikacyjnych, przy jednocześnie rosnącej liczbie produkowanych inteligentnych urządzeń spowodowało zmianę technologii budowy rozproszonych systemów pomiarowo-sterujących [MarMic00]. Począwszy od roku 1970 dominującą technologią budowy takich systemów była architektura multiplekserowa (rys. 1.1a), w której podstawową techniką komunikacyjną był sygnał prądowy (4-20)mA. Od początku lat 90-tych obserwuje się dużą dynamikę wzrostu zainteresowania architekturą sieciową (rys. 1.1c), w której przesyłane są dane cyfrowe w sposób szeregowy. Zainteresowanie to jest stymulowane przez rosnące zapotrzebowanie na systemy otwarte, powszechne stosowanie transmisji cyfrowej, powszechność technologii informatycznych, rosnącą inteligencję urządzeń pomiarowo – sterujących, wprowadzanie statystycznej kontroli procesów produkcyjnych wynikającej z dążenia do poprawy jakości, zapotrzebowanie na obiektywną i rzetelną informację, potrzebę zdolności do szybkiego przekonfigurowania systemu produkcji oraz zmniejszanie zużycia czynników energetycznych. Poza wymienionymi czynnikami stymulującymi rozwój architektury sieciowej, jej stosowanie może przynieść wymierne korzyści, do których można zaliczyć: niższy koszt okablowania, instalowania i uruchamiania, skrócenie czasu przestoju, zwiększenie niezawodności i wydajności systemu, łatwe konfigurowanie dzięki uzależnieniu od oprogramowania a nie od sprzętu, możliwość samo-konfigurowania (*plug & play*).



Rys. 1.1. Architektury rozproszonych systemów pomiarowo – sterujących

Przejście od architektury multiplekserowej rozproszonych systemów pomiarowo – sterujących do architektury sieciowej lub mieszanej zmieniło podejście do ich projektowania. Skutki podejmowanych decyzji projektowych dotyczących np. wyboru protokołu komunikacyjnego, topologii lub nośnika mają duży wpływ na parametry czasowe i jakościowe projektowanego systemu [DrwJak99] [JosPan96].

W rozwiązaniu o architekturze multiplekserowej mierzone wielkości otrzymane z przetworników zamontowanych w szafach były dostarczane do koncentratorów pomiarowych, w których następowało przetworzenie informacji na postać cyfrową. Takie rozwiązanie stawia wysokie wymagania niezawodnościowe dla koncentratora pomiarowego i obsługującego komputera. Awaria jednego z tych urządzeń powoduje utratę pełnej kontroli nad obiektem. Dopiero informacja po przetworzeniu na postać cyfrową była zapisywana w bazie danych, z której mogły korzystać aplikacje funkcjonujące na obiekcie. W szafach, gdzie umieszczono przetworniki, dostęp do informacji pomiarowej był utrudniony, a więc utrudnione było prowadzenie prac diagnostycznych lub konserwacyjnych.

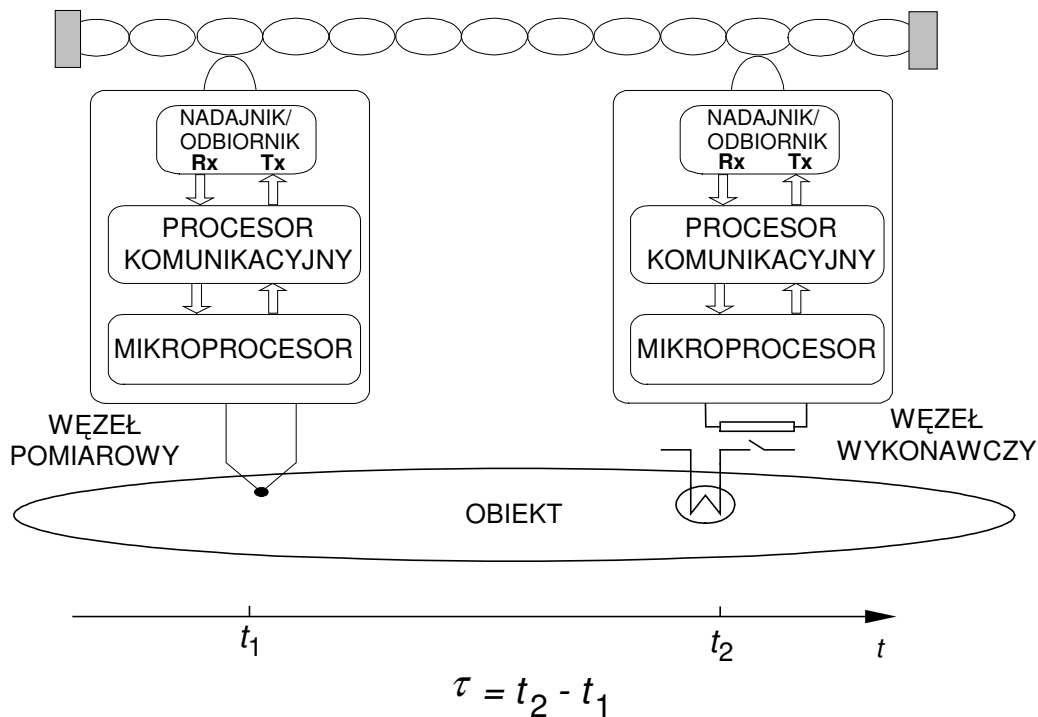
Zastosowanie w miejsce przetworników pomiarowych z wyjściem analogowym inteligentnych przetworników z wyjściem cyfrowym powodowało znaczne zmniejszenie kosztów okablowania, zwiększenie niezawodności, ułatwiało konfigurowanie lub nawet

samokonfigurowanie, zdalną diagnostykę i zdalne konfigurowanie [MasMin01][UhlHan02][Boj05]. Ponadto jest możliwe korzystanie z danych pomiarowych przez wielu użytkowników, poczynając już od najniższego poziomu tzn. od miejsca jej pozyskiwania, aż do użytkowników pracujących na najwyższych poziomach hierarchicznego modelu przedsiębiorstwa. Inteligentne przetworniki z wyjściem cyfrowym mogą przyjmować informację od innych urządzeń pracujących w sieci przemysłowej lub z aplikacji informatycznych pracujących na wyższych poziomach i na tej podstawie mogą one podejmować decyzje lokalne wraz z oddziaływaniem na nadzorowany fragment obiektu. W takiej strukturze możemy mówić o przetwarzaniu rozproszonym realizowanym przez urządzenia pracujące na poziomie warstwy pomiarowo – sterującej [Mic98][Mic99]. Oznacza to możliwość decentralizacji funkcji realizowanych dotychczas na poziomach wyższych. Takie rozwiązanie podnosi niezawodność całego systemu (brak centralnego sterownika) i zmniejsza czas reakcji na stany awaryjne.

1.4. Przyczyny powstawania opóźnień w systemie

Z funkcjonowaniem systemu związane jest powstawanie opóźnień w transmisji danych od miejsca ich pozyskiwania do miejsca ich wykorzystania w systemie.

W celu identyfikacji przyczyn powstawania opóźnień w RSPS rozważono najprostszy przypadek, w którym do segmentu sieci przemysłowej podłączone są tylko dwa węzły (rys. 1.2), a wymiana danych na magistrali komunikacyjnej odbywa się według zasady *peer to peer*.



Rys. 1.2. Segment rozproszonego systemu pomiarowo - sterującego

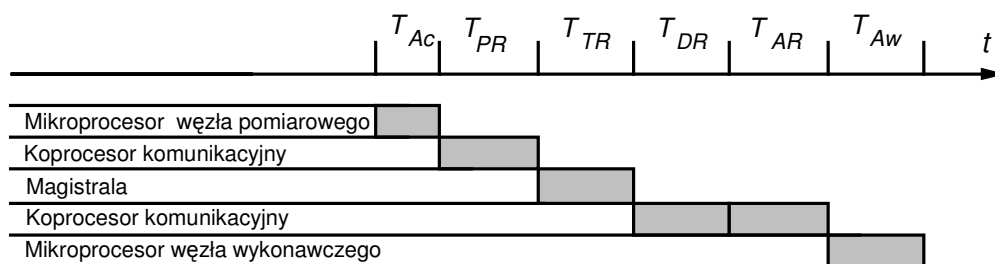
Często jest tak, że dane pomiarowe powstają w jednym węźle systemu, natomiast ich wykorzystanie do sterowania obiektem następuje w innym węźle. Mówiąc o opóźnieniach w transmisji danych w RSPS (τ) mamy na uwadze czas, który mija od momentu pozyskania danych (t_1) (spróbkowania wielkości wejściowej) w węźle pomiarowym do momentu ich wykorzystania w węźle wykonawczym, czyli do momentu wystereowania elementu

wykonawczego (t_2). W przypadku ogólnym można mówić o opóźnieniach w transmisji danych pomiędzy ich źródłowym a docelowym punktem systemu.

W typowym przypadku w każdym węźle należy wyróżnić bloki funkcjonalne:

- mikroprocesor (układ pomiarowy lub wykonawczy z mikroprocesorem) realizujący zadania programowego przetwarzania wielkości mierzonej lub sterującej,
- układ specjalizowany realizujący funkcje protokołu komunikacyjnego,
- układy nadawczo - odbiorcze umożliwiające dopasowanie poziomów sygnałów na magistrali systemu.

Wykonując szacowanie maksymalnego czasu pojedynczej wymiany danych T_p pomiędzy dwoma węzłami należy wziąć pod uwagę wszystkie opóźnienia cząstkowe wprowadzane przez elementy sprzętowe i programowe występujące w systemie [KwiBigMró99]. Opóźnienia cząstkowe przedstawiono w postaci diagramu na rys. 1.3.



Rys. 1.3. Diagram czasowy wymiany

Zatem maksymalny czas pojedynczej wymiany T_p pomiędzy dwoma węzłami jest sumą opóźnień cząstkowych

$$T_p = T_{AC} + T_{PR} + T_{TR} + T_{DR} + T_{AR} + T_{AW} , \quad (1.1)$$

gdzie:

T_{AC} - czas realizacji pojedynczego cyklu programu węzła pomiarowego zawiązany z pozyskaniem danych,

T_{PR} - czas przygotowania ramki,

T_{TR} - czas transmisji ramki,

T_{DR} - czas detekcji ramki,

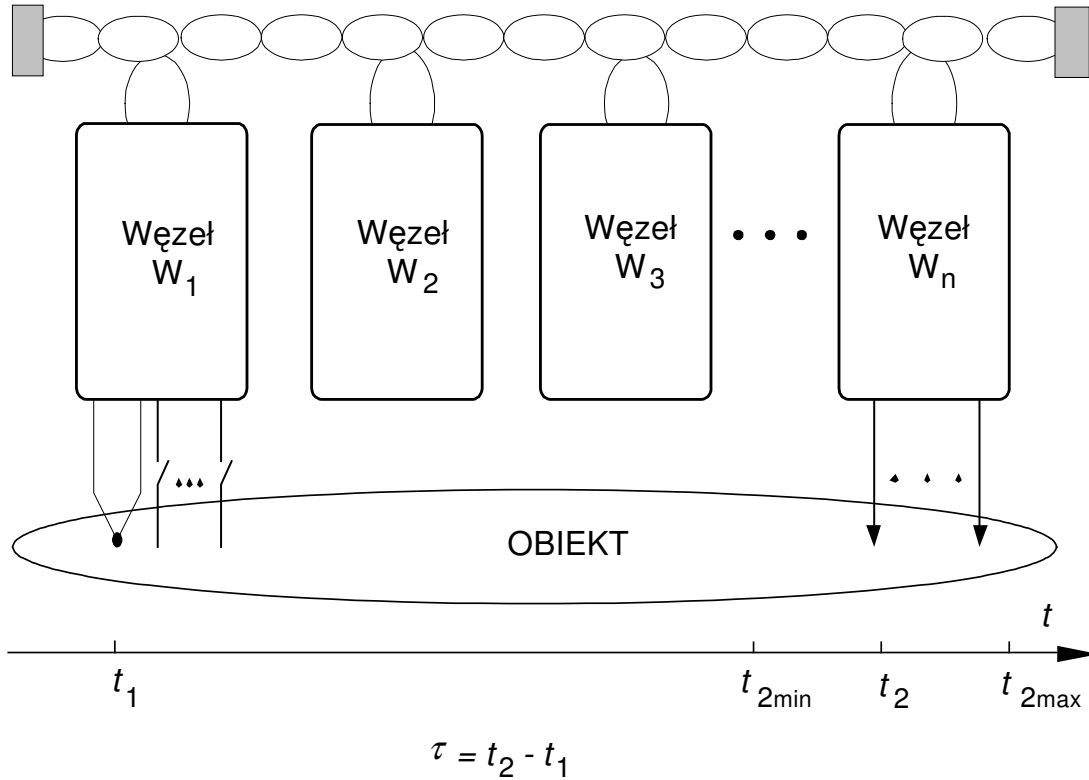
T_{AR} - czas analizy ramki,

T_{AW} - czas realizacji pojedynczego cyklu programu w węźle wykonawczym związany z wykorzystaniem danych.

W rozważanym przypadku wyznaczony maksymalny czas pojedynczej wymiany może być utożsamiany z maksymalnym czasem opóźnienia w transmisji danych w systemie. Można także mówić o deterministycznym charakterze tego opóźnienia, ponieważ wszystkie składniki tak wyznaczonego czasu pojedynczej wymiany są stałe.

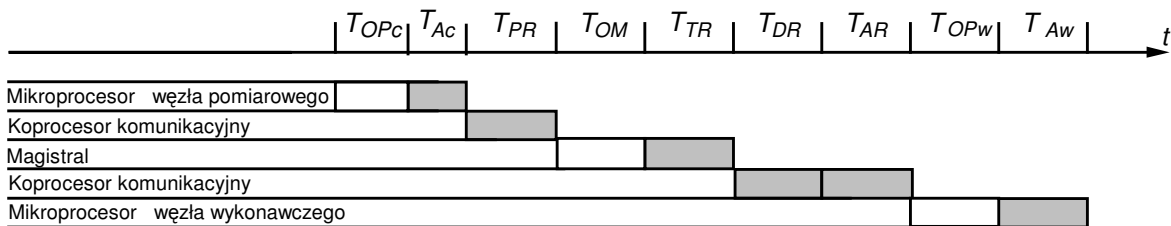
Zazwyczaj w segmencie sieci przemysłowej pracuje więcej węzłów, ale dane nadal przesyłane są tym samym medium komunikacyjnym. Mamy w takiej sytuacji do czynienia z współużytkowaniem medium komunikacyjnego. Zasady współużytkowania medium komunikacyjnego określone są przez standard zastosowanego rozwiązania sieci przemysłowej. Opóźnienie wprowadzane przez element związany z transmisją jest zależne od wszystkich wymian danych przeprowadzanych w systemie i w każdej wymianie może być inne. W rzeczywistym systemie jest jednak więcej współużytkowanych zasobów. Są nimi mikroprocesory w węzłach, które są współużytkowane przez podprogramy związane z

różnymi zadaniami wykonywanymi przez węzeł, w tym zadaniami pomiarowymi. Współużytkowane są także bufory danych, w których przechowuje się dane pomiarowe przed przesłaniem medium komunikacyjnym. Wobec powyższego podczas analizy systemu należy brać także pod uwagę wpływ wszystkich współużytkowanych zasobów (rys. 1.4).



Rys. 1.4. Współużytkowany segment rozproszonego systemu pomiarowo - sterującego

Z zagadnieniem współużytkowania elementów systemu jest związany problem szeregowania zadań. Szeregowanie zadań dokonuje alokacji czasu procesora, czy też innego współużytkowanego zasobu do zadań w taki sposób, aby wymagania czasowe poszczególnych zadań oraz systemu były spełnione. Zanim nastąpi przydzielenie czasu procesora najczęściej występuje faza oczekiwania. Uwzględnienie fazy oczekiwania na przydzielenie czasu procesora węzła pomiarowego, procesora węzła wykonawczego czy też dostęp do magistrali komunikacyjnej uwzględniono w diagramie wymiany przedstawionym na rys. 1.5.



Rys. 1.5. Diagram czasowy wymiany uwzględniający czasy oczekiwania

W takim przypadku maksymalny czas pojedynczej wymiany T_{Po} pomiędzy dwoma węzłami uwzględniający czasy oczekiwania będzie równy:

$$T_{Po} = T_P + T_{OPc} + T_{OM} + T_{OPw}, \quad (1.2)$$

gdzie:

T_P - maksymalny czas pojedynczej wymiany pomiędzy węzłami systemu bez uwzględnienia oczekiwania,

T_{OPc} - czas oczekiwania na dostęp do procesora węzła pomiarowego,

T_{OM} - czas oczekiwania na dostęp do magistrali komunikacyjnej systemu,

T_{OPw} - czas oczekiwania na dostęp do procesora węzła wykonawczego.

Zakładając, że wymienione czasy oczekiwania w każdej wymianie mogą być inne (rys. 1.4), można mówić o zmiennym charakterze opóźnień w systemie.

W pracy uwzględniono opóźnienia związane z realizacją zadań programowych w węzłach i na magistrali komunikacyjnej systemu przyjmując, że opóźnienia wnoszone przez część sprzętową węzłów są znane.

1.5. Parametry charakteryzujące właściwości rozproszonych systemów pomiarowo – sterujących

Wśród parametrów opisujących właściwości rozproszonych systemów pomiarowo - sterujących zdefiniowanych w literaturze, na pierwszy plan wysuwają się parametry charakteryzujące właściwości czasowe takich systemów. Zdefiniowanych jest również szereg innych parametrów opisujących właściwości RSPS.

W grupie parametrów opisujących właściwości czasowe RSPS podstawowym parametrem jest czas reakcji systemu na zdarzenia zachodzące na obiekcie, rozumiany jako wypadkowa czasów reakcji jego pojedynczych elementów [Kwi00]. Jest to czas, który upływa pomiędzy chwilą wykonania pomiaru a podjęciem sterowania [TinBurWel95]. Czas reakcji systemu określany jest także jako opóźnienie reakcji systemu lub czas odpowiedzi [Mic00][Żur04]. Jak zaznaczono w rozdziale 1.4, źródłem opóźnień w systemie są różne jego elementy. Czas reakcji może być wobec tego wyznaczany dla poszczególnych elementów systemu np. dla magistral komunikacyjnych [UpeDea96] [Upe94], czy też węzłów systemu [Mic02]. W przypadku magistral komunikacyjnych zdefiniowano także czas opóźnienia w dostępie do medium komunikacyjnego [HeyLicRat93].

Kolejne istotne parametry opisujące właściwości czasowe RSPS to cykl sieci i cykl wymiany informacji. Przez cykl sieci należy rozumieć czas, który upływa od momentu rozpoczęcia przez określony węzeł transmisji danych do momentu uzyskania przez ten węzeł po raz kolejny uprawnień do rozpoczęcia transmisji [Kwi00]. Parametr ten jest wyznaczany dla sieci przemysłowych pracujących wg metody dostępu *token ring* i *token passing* (czas obiegu znacznika). Całkowity czas potrzebny do wyemitowania wszystkich danych, można nazwać cyklem wymiany informacji. Cykl wymiany informacji może być równy cyklowi sieci lub może być całkowitą wielokrotnością cyklu sieci.

W pracy [Żab03] w ramach analizy czasowej wybranych magistral miejscowych zdefiniowano parametry: całkowity czas przesyłania danych, czas narzutu protokołu (przekazywanie znacznika, zapytanie stacji master), czas przesyłania danych nadmiarowych, czyli tych elementów, które są dołączane do transmitowanej wiadomości przez warstwę łącza danych i warstwę fizyczną (pole adresowe, pole kontrolne itp.).

Dla sieci przemysłowych zdefiniowano parametry charakteryzujące obciążenie magistrali komunikacyjnej, takie jak sprawność sieci η oraz przepustowość użyteczna sieci P [Kwi00].

Dla sieci przemysłowych o dostępie do nośnika wg zasady *maser – slave* sprawność sieci η wyraża się stosunkiem czasu transmisji danych użytkowych w pojedynczej transakcji wymiany do całkowitego czasu pojedynczej transakcji danych i określana jest zależnością:

$$\eta = \frac{\frac{n \cdot 8}{V}}{T_{wi}}, \quad (1.3)$$

gdzie:

- n - liczba bajtów danych użytkowych transmitowana w pojedynczej wymianie,
- T_{wi} - całkowity czas pojedynczej transakcji wymiany,
- V - szybkość transmisji danych.

Przepustowość użyteczną sieci P wyraża się jako stosunek liczby danych użytkowych w pojedynczej transakcji wymiany do całkowitego czasu pojedynczej transakcji wymiany i określona jest zależnością:

$$P = \frac{n \cdot 8}{T_{wi}} [kb/s], \quad (1.4)$$

gdzie :

- n - liczba bajtów danych użytkowych transmitowana w pojedynczej wymianie,
- T_{wi} - całkowity czas pojedynczej transakcji wymiany.

Wymienione parametry η i P mogą być wyznaczone bez uwzględnienia czasu cyklu automatów, czasów detekcji i przetwarzania ramki, oraz czasu transmisji ramki żądania. W tym przypadku parametry te stają się miarą narzutu czasowego wnoszonego przez warstwę liniową sieci [Kwi00] i są określone zależnościami:

$$\eta_n = \frac{\frac{n \cdot 8}{V}}{\frac{L_{ZT} \cdot L_{BZ} + B_S}{V}} = \frac{n \cdot 8}{L_{ZT} \cdot L_{BZ} + B_S}, \quad (1.5)$$

$$P_n = \frac{n \cdot 8}{L_{ZT} \cdot L_{BZ} + B_S} V [kb/s], \quad (1.6)$$

gdzie:

- V - szybkość transmisji danych,
- L_{ZT} - liczba znaków w ramce zawierającej dane,
- L_{BZ} - liczba bitów przypadająca na jeden znak transmisji,
- B_S - liczba bitów transmisyjnych, które dokłada warstwa liniowa.

W pracy [Mic00] zdefiniowano model współczynnika obciążenia k_{obc} sieci przemysłowej o n węzłach i szybkości transmisji V_{tr} , który jest określony zależnością:

$$k_{obc} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n W_i \right) \cdot k_{bezp}}{V_{tr}}, \quad (1.7)$$

gdzie:

k_{bezp} - współczynnik bezpieczeństwa ($k_{bezp} = 1...5$),

W_i - liczba bitów niezbędna do wykonania cyklu komunikacyjnego z i -tym węzłem.

Dla sieci przemysłowych wykorzystujących klasyczną metodę *master-slave* dostępu do nośnika, W_i oblicza się z poniższej zależności:

$$W_i = L_i(2T_{syn} + F_{ini} + F_{odp}) \text{ [bity/sek]}. \quad (1.8)$$

Natomiast dla sieci przemysłowej wykorzystującej metodę dostępu do nośnika *peer to peer*, W_i oblicza się z zależności:

$$W_i = L_i(T_{syn} + F_{odp}) \text{ [bity/sek]}. \quad (1.9)$$

gdzie:

L_i - liczba zwrotów do i -tego węzła podczas jednego cyklu technologicznego [1/sek],

T_{syn} - długość czasu synchronizacji występujący pomiędzy kolejnymi cyklami komunikacyjnymi [bity],

F_{ini} - długość ramki inicjującej cyklu komunikacyjnego wysyłanej przez węzeł *master* [bity],

F_{odp} - długość ramki odpowiedzi, wysyłanej przez węzeł *slave* lub węzeł *master* [bity].

Suma W_i dla wszystkich węzłów jest zapotrzebowaniem na przepustowość komunikacyjną systemu.

Wartość współczynnika k_{bezp} przyjmowana jest arbitralnie. Zależy ona od warunków w jakich pracuje sieć przemysłowa i od wymagań stawianych przez obiekt i aplikacje wykorzystujące dane pomiarowo – sterujące. W przypadku zastosowań przemysłowych, gdzie w wyniku oddziaływania zakłóceń zachodzi potrzeba dokonywania retransmisji oraz w sytuacjach wymagających szybkiej reakcji na zdarzenia np. w stanach awaryjnych, pożądana jest nadmiarowość więc wartość tego współczynnika w wielu przypadkach powinna oscylować w granicach 3-5. Szybkość transmisji V_{tr} powinna być tak dobrana, aby współczynnik obciążenia sieci przemysłowej k_{obc} nie był większy od 1. Jeżeli istnieje taka możliwość, to wartość tego współczynnika powinna zawierać się w przedziale od 0,5 do 1. Jeżeli wartość k_{obc} przekroczy wartości 1, oznacza to możliwość wystąpienia takiej sytuacji, w której sieć przemysłowa może być zbyt wolna w stosunku do potrzeb. Wartość k_{obc} mniejsza 0,5 oznacza, że sieć przemysłowa jest przewymiarowana i posiada znaczną rezerwę, a więc taką sieć można jeszcze rozbudowywać.

Jako najistotniejszy parametr opisujący właściwości rozproszonych systemów pomiarowo - sterujących należy uznać czas reakcji (czas odpowiedzi systemu). Czas ten jest sumą czasów reakcji poszczególnych elementów składowych systemu uczestniczących w przetwarzaniu, przechowywaniu i przesyłaniu danych.

Zdecydowana większość prac, w których jest poruszana tematyka RSPS, jest skierowana na badanie właściwości czasowych magistral komunikacyjnych. Badania te umożliwiają określenie czasu odpowiedzi dla magistral komunikacyjnych jako istotnych elementów systemu.

Podkreślenia wymaga fakt braku wskaźników jednoznacznie określających poprawność pracy systemu (chyba że zakłada się, że projektowane systemy działają poprawnie), a dalsza analiza przeprowadzana jest pod kątem dotrzymania ograniczeń czasowych.

1.6. Cel i teza pracy

Celem pracy jest badanie związków zachodzących między opóźnieniami w transmisji danych w rozproszonych systemach pomiarowo – sterujących, a przyczynami ich powstawania i skutkami jakie niosą. Duża różnorodność sytuacji, w których te opóźnienia występują, duża złożoność analitycznego opisu tego rodzaju związków oraz wymóg znajomości, już na etapie projektowania, wielkości i charakteru tych opóźnień wyznaczają podstawowy sposób realizacji celu pracy. Jest nim opracowanie modeli symulacyjnych do badania właściwości rozproszonego systemu pomiarowo – sterującego. Tak przygotowane modele symulacyjne mogą być podstawą, jeszcze w fazie projektowania, do modyfikacji struktury systemu czy też struktury węzłów oraz mogą wskazywać na zmiany parametrów czasowych jakie powinny być spełnione przez węzły lub magistralę systemu.

W związku z tak postawionym celem pracy można sformułować następującą tezę rozprawy, która brzmi:

„modele symulacyjne rozproszonego systemu pomiarowo-sterującego oparte o metodę przeglądania działań i planowania zdarzeń pozwalają na wyznaczenie wartości parametrów opisujących właściwości tych systemów, istotnych dla prawidłowego doboru struktury węzłów i struktury systemu z występującymi ograniczeniami czasowymi.”

Udowodnienie tak postawionej tezy wymaga:

- opracowania modeli strukturalnych RSPS, a na tej podstawie opracowania modeli symulacyjnych umożliwiających analizę właściwości systemów,
- opracowania parametrów w sposób jednoznaczny określający prawidłowość działania RSPS,
- wykonania modeli symulacyjnych i weryfikację poprawności ich działania na drodze analitycznej i doświadczalnej,
- przeprowadzenia, w oparciu o wykonany model symulacyjny, badań symulacyjnych właściwości RSPS potwierdzających wpływ doboru struktury węzłów i struktury systemu na wartości parametrów opisujących właściwości tych systemów.

1.7. Zawartość rozprawy

Oprócz niniejszego rozdziału praca zawiera jeszcze siedem rozdziałów. Rozdział drugi zawiera przegląd metod analizy właściwości czasowych rozproszonych systemów pomiarowo – sterujących oraz zawiera uzasadnienie celowości podjęcia prezentowanych w pracy kierunków badań. W rozdziale trzecim przedstawiono model komunikacyjny i model zadania rozproszonego systemu pomiarowo - sterującego, które są punktem wyjścia do konstrukcji modeli symulacyjnych systemu. W rozdziale czwartym omówiono zastosowane w realizacji modelu metody symulacji dyskretnej. Rozdział piąty zawiera opis opracowanych modeli strukturalnych i symulacyjnych opartych o metodę przeglądania działań oraz metodę planowania zdarzeń. W rozdziale szóstym dokonano oceny poprawności działania modeli symulacyjnych. W tym celu wykorzystano elementy teorii szeregowania zadań oraz specjalnie w tym celu zbudowany model fizyczny RSPS. Rozdział siódmy zawiera opis badań wykonanych z użyciem modelu symulacyjnego w celu określenia wpływu liczby zadań realizowanych w systemie, wpływu struktury systemu i struktury węzła na właściwości rozproszonego systemu pomiarowo – sterującego.

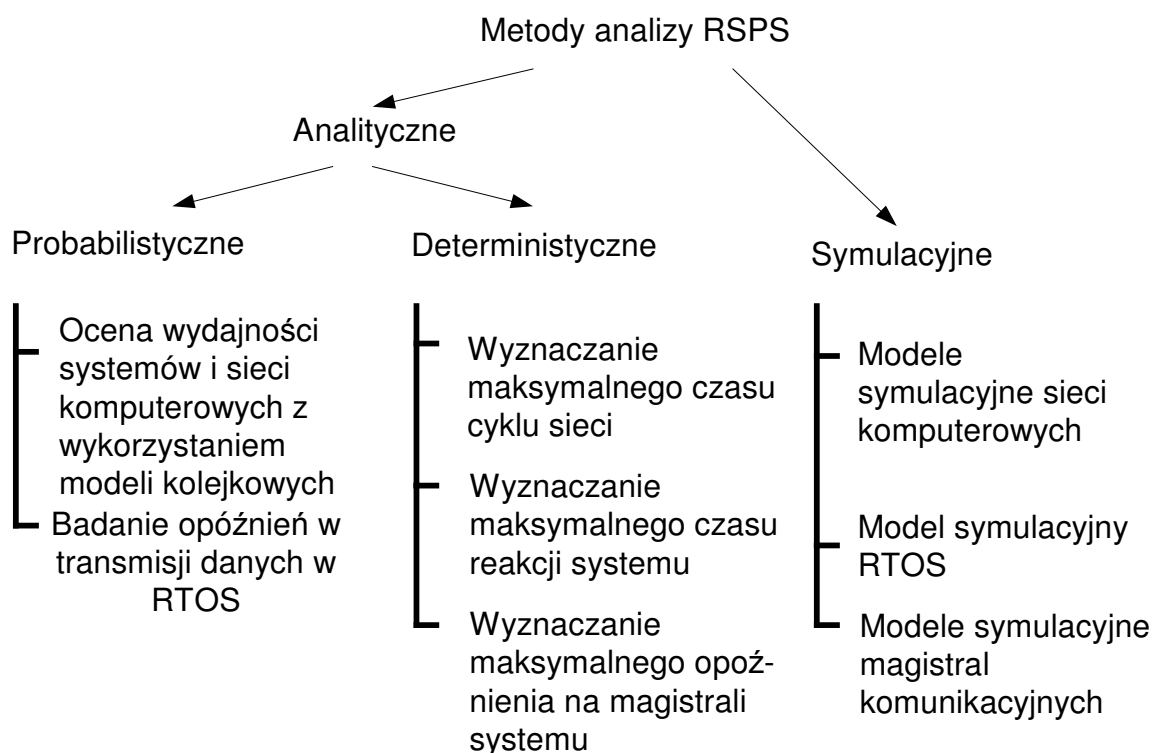
Pracę zamyka rozdział ósmy, który zawiera podsumowanie oraz wnioski końcowe.

2. METODY ANALIZY ROZPROSZONYCH SYSTEMÓW POMIAROWO – STERUJĄCYCH

2.1. Wprowadzenie

Właściwości czasowe rozproszonych systemów pomiarowo - sterujących są przedmiotem licznych badań, których wyniki są publikowane w materiałach konferencyjnych, literaturze naukowej oraz periodycznych wydawnictwach specjalistycznych.

Prezentowane w tych pracach metody analizy RSPS można podzielić na dwie grupy: metody analityczne i metody symulacyjne (rys. 2.1). Wśród metod analitycznych można wyróżnić metody probabilistyczne i metody deterministyczne.



Rys. 2.1. Metody analizy rozproszonych systemów pomiarowo – sterujących

Zakres zastosowania metod probabilistycznych jest ograniczony dlatego ich uzupełnieniem i zarazem rozwinięciem są odpowiadające im metody symulacyjne. Dotyczy to modeli kolejkowych przeznaczonych do badania wydajności sieci i systemów komputerowych oraz analitycznego opisu opóźnień w transmisji danych w systemach operacyjnych czasu rzeczywistego.

Metody deterministyczne, chociaż poszczególne z nich prezentują inne podejście, umożliwiają wyznaczenie maksymalnego i minimalnego czasu reakcji systemu lub czasu reakcji jego poszczególnych elementów.

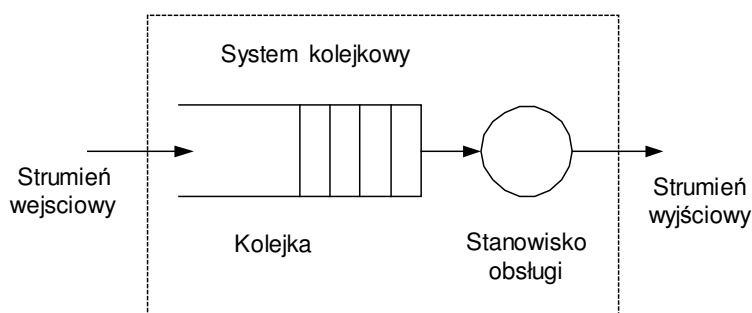
Do metod symulacyjnych można zaliczyć metody będące kontynuacją wymienionych metod probabilistycznych oraz metody symulacyjne stosowane w zakresie badania własności czasowych magistral komunikacyjnych.

2.2. Metody probabilistyczne i ich symulacyjne kontynuacje

2.2.1. Metody analizy systemów komputerowych

Do oceny projektowanych systemów komputerowych, pod względem zależności czasowych, buduje się modele matematyczne takich systemów [Cza99] [Cza99b][HasJai04][Tom96]. Najczęściej wykorzystywane są modele opisywane w teorii masowej obsługi, przedstawiające system komputerowy w postaci sieci stanowisk obsługi. Stanowiska odpowiadają elementom danego systemu – jednostce centralnej, pamięciom zewnętrznym, liniom transmisyjnym i terminalom. W sieci stanowisk „krąży” klienci, którzy są obsługiwani w stanowiskach lub czekają na obsługę w kolejkach do tych stanowisk.

W ogólnej postaci system kolejkowy można przedstawić za pomocą schematu blokowego podanego na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Schemat blokowy systemu kolejkowego

Na wejściu systemu pojawia się pewien ciąg zgłoszeń wymagający obsługi, nazywany strumieniem wejściowym. Zgłoszenia pojawiające się w systemie są kierowane bezpośrednio do obsługi w przypadku wolnego stanowiska obsługi lub też gromadzone w kolejce, gdzie oczekują na zwolnienie stanowiska obsługi. Strumień zgłoszeń uzyskany na wyjściu systemu nosi nazwę strumienia wyjściowego.

Czasy obsługi w stanowiskach, odstępy czasu między nadchodzącymi nowymi zadaniami i droga klientów w sieci podane są w postaci rozkładów prawdopodobieństwa.

Poprzez zastosowanie zaawansowanego aparatu matematycznego istnieje możliwość określenia parametrów charakteryzujących zachowanie badanego systemu takich jak: średnich długości kolejek, średnich czasów oczekiwania, średniego czasu całkowitej realizacji zadania.

Modele probabilistyczne są rozwiązywane w sposób analityczny jedynie przy określonych założeniach, przy czym metoda rozwiązania zależy od przyjętych rozkładów czasów obsługi, strumieni wejściowych, regulaminów szeregowania zadań w kolejkach [Cza99].

Ogólnie metody analizy systemów kolejkowych można podzielić na dwie grupy [Fil96]: metody analityczne i metody symulacyjne. Istota metod analitycznych sprowadza się do ułożenia i rozwiązania układów równań różniczkowych wiążących ze sobą prawdopodobieństwo zdarzeń występujących w procesie obsługi.

Metody symulacyjne polegają na syntezy algorytmu symulującego funkcjonowanie danego systemu przy obsłudze strumienia zgłoszeń. Wielokrotna komputerowa realizacja procesu obsługi przy użyciu tego algorytmu, a następnie opracowanie statystyczne rezultatów otrzymanych przy wszystkich realizacjach umożliwiają znalezienie interesujących nas współzależności oraz wartości wskaźników jakości badanego systemu kolejkowego.

Metody analityczne można stosować do opisu stosunkowo prostych systemów pod warunkiem, że są spełnione dość silne założenia dotyczące strumieni zgłoszeń oraz czasów obsługi. W praktycznych zastosowaniach założenia te stosunkowo rzadko są spełnione i stanowią zbyt duże uproszczenie. Pomimo tego metody te są przydatne do wyznaczania średnich wartości parametrów komunikacyjnych w systemach komputerowych.

Modele symulacyjne są znacznie bardziej elastyczne od modeli analitycznych [Cza99]. Potrafią opisać bardziej złożone mechanizmy obiegu klientów w sieci i wzajemnych zależności między klientami, łatwo jest też uwzględnić generatory dowolnych rozkładów czasu. Ich wadą jest znacznie dłuższy czas wykonania – symulację pracy sieci trzeba prowadzić dostatecznie długo, aby wyniki były wiarygodne, tzn., by można było powiedzieć, że zebrane wartości średnie różnią się od wartości dokładnych o dostatecznie małą wartość z dostatecznie dużym prawdopodobieństwem. Dlatego modele analityczne można stosować do zbadania wielu wariantów projektowanego systemu, by później, po zawężeniu obszaru poszukiwań zbudować dokładniejszy model symulacyjny. Możliwe jest też utworzenie modelu symulacyjnego bardziej złożonego fragmentu systemu, którego całość opisuje model analityczny.

W ostatnich latach, w związku z szybkim rozwojem informatyki, szczególnego znaczenia nabierają symulacyjne metody analizy systemów kolejkowych [Fil96]. Metoda symulacji stanowi jedyną efektywną metodę analizy złożonych wielokanałowych i wielofazowych systemów obsługi przy dowolnych wejściowych strumieniach zgłoszeń i funkcjach rozkładów czasów obsługi. Systemy takie najczęściej występują w zagadnieniach praktycznych.

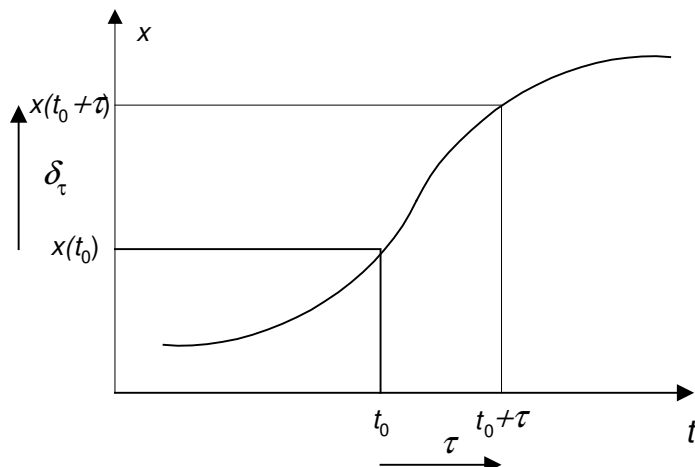
2.2.2. Badanie opóźnień w transmisji danych w systemach operacyjnych czasu rzeczywistego

Metoda badania opóźnień w transmisji danych w systemach czasu rzeczywistego jest przedmiotem pracy [JakHam99]. W pracy rozpatrywane są opóźnienia powodowane przez systemy operacyjne przyrządów mikroprocesorowych i sieciowy system operacyjny. Przedstawiono opis analityczny (opóźnień) oraz model symulacyjny do badania tego rodzaju opóźnień, przy czym założono losową inicjację poszczególnych zadań realizowanych przez system operacyjny. Model symulacyjny jest testowany przez porównanie wyników symulacji jego działania z opisem analitycznym dla podstawowych sytuacji związanych z realizacją zadań przez rzeczywisty system operacyjny. W pracy przedstawiono także koncepcję wykorzystania opisanego modelu do badań systemu operacyjnego QNX w połączeniu z pomiarem opóźnień w warunkach typowych dla systemu.

Występowanie opóźnień czasowych jest interpretowane jako czynnik powodujący powstanie specyficznego rodzaju błędów pomiarowych w sposób pokazany na rys. 2.3. Pomiar wielkości $x(t)$ w chwili czasu t_0 dostarcza wyniku $x(t_0)$, który dociera do urządzenia wykonawczego z opóźnieniem τ . W chwili $t_0 + \tau$ rzeczywista wartość wielkości mierzonej wynosi $x(t_0 + \tau)$, zatem różnica

$$\delta_{\tau}(t_0) = x(t_0) - x(t_0 + \tau) \quad (2.1)$$

stanowi błąd spowodowany opóźnieniem w transmisji wyniku wynoszącym τ . Błąd ten zależy od szybkości zmian mierzonego przebiegu oraz od wartości opóźnienia τ .



Rys. 2.3. Ilustracja powstawania błędu opóźnienia transmisji danych [JakHam99]

Systemy czasu rzeczywistego pracują z zasady w sposób ciągły, a zatem pomiary wykonywane są wielokrotnie. Ponadto opóźnienia powodowane są przez wiele czynników zarówno o charakterze deterministycznym jak i losowym. W praktyce przyczyny powodujące opóźnienia danych są charakteryzowane przez zbiór opóźnień $\{\tau\}$. Zbiór ten może być przekształcony w zbiór błędów $\{\delta_\tau\}$ w sposób opisany w pracy [Ham02].

Można zatem stwierdzić, że punktem wyjścia do wnioskowania o niedokładności związanej z opóźnieniami transmisji danych w systemie jest wyznaczenie zbioru opóźnień cząstkowych wprowadzanych przez takie działania w systemie, które mają wpływ na różnicę między wartością uzyskaną w odbiorniku a rzeczywistą wartością wielkości mierzonej w tym momencie.

W pracy [Ham02] przedstawiono analityczny opis powstających opóźnień w przypadku realizacji dwóch i trzech zadań w sposób deterministyczny oraz opis w przypadku kiedy zadania inicjowane są w sposób losowy. Zaprezentowano w jaki sposób można wyznaczyć gęstość prawdopodobieństwa opóźnienia znając gęstość prawdopodobieństwa momentów inicjacji pozostałych zadań. Jednak, jak wyraźnie zaznacza autor pracy, analityczny opis opóźnień ma w praktyce ograniczony zakres zastosowań ponieważ może być przydatny jedynie w najprostszych przypadkach. Już w przypadku, gdy dystrybutor zarządza 3 zadaniami, analityczny opis opóźnienia staje się dość złożony. Złożoność ta rośnie szybko wraz ze wzrostem liczby zadań. Powoduje to konieczność wyznaczenia rozkładów opóźnień w sposób symulacyjny. Program symulacyjny jest testowany dla prostych przypadków przez porównanie wyników uzyskiwanych za jego pomocą z opisem analitycznym. Na tej podstawie twierdzi się poprzez indukcję, że wyniki uzyskiwane dla bardziej złożonych sytuacji są poprawne. Algorytm symulacyjny ma taką samą strukturę jak algorytm realizowany w praktyce.

Potwierdzenie użyteczności metod symulacyjnych można znaleźć w kolejnej pracy z tego samego zakresu tematycznego. Opóźnienia powodowane przez inne zadania zależą od wielu czynników, przede wszystkim od zastosowanej procedury planowania zadań, liczby zadań, ich czasu trwania, częstości występowania i innych. Duża liczba różnych czynników i złożony mechanizm ich wpływu na opóźnienie wypadkowe powodują, że uzyskiwanie analitycznego opisu opóźnień jest możliwe tylko w najprostszych przypadkach. Stąd podstawowym źródłem informacji o opóźnieniach transmisji w konkretnych warunkach realizacji zadań są badania symulacyjne [JakHamŻur01].

Modyfikacja przedstawionego w pracy [JakHam99] modelu w celu podjęcia badań systemu operacyjnego QNX, jako reprezentatywnego dla systemów czasu rzeczywistego jest przedstawiona w pracy [ŻurHam02]. Natomiast zastosowanie opisanej metodyki do badania błędów spowodowanych opóźnieniami w transmisji danych w systemie QNX jest przedstawione w pracy [Ham02]. Badane opóźnienia są określone jako opóźnienia programowe i są sumą dwóch opóźnień – własnego, spowodowanego wykonywaniem zadania oraz dodatkowego związanego ze współbieżną realizacją wielu zadań przez wielozadaniowy system operacyjny.

System operacyjny QNX jest stosowany do zarządzania systemami pomiarowo - sterującymi jako całością, ale może on być również wykorzystywany w urządzeniach pomiarowych i wykonawczych będących elementami składowymi systemu. W takim przypadku programowe opóźnienie wypadkowe jest sumą trzech opóźnień wprowadzanych przez: systemy operacyjne urządzenia pomiarowego, nadrzędny system operacyjny systemu pomiarowo – sterującego oraz przez system operacyjny urządzenia wykonawczego. Ponadto, gdy uwzględni się dodatkowo opóźnienia sprzętowe w urządzeniach pomiarowych i wykonawczych, to w ogólnym przypadku można przyjąć, że opóźnienie wypadkowe danych jest sumą wielu opóźnień cząstkowych.

Jednym z podstawowych powodów wyznaczania błędów spowodowanych opóźnieniami jest potrzeba uwzględnienia ich w ogólnym bilansie błędów będącym podstawą do wyznaczenia niepewności danych uzyskiwanych w systemie pomiarowo – sterującym. W takim przypadku najdogodniejsze jest posługiwanie się błędem wypadkowym obejmującym wszystkie błędy spowodowane opóźnieniami w systemie [Jak04][Jak04b].

2.3. Metody deterministyczne

2.3.1. Wyznaczanie maksymalnego czasu cyklu sieci

Wysuwając na pierwszy plan zagadnienia związane z ograniczeniami czasowymi oraz mając na uwadze przemysłowe zastosowania systemów sieciowych można stwierdzić [Kwi00], że współczesne systemy komputerowe stosowane w przemyśle, projektowane z myślą o sterowaniu i monitorowaniu procesów przemysłowych są klasycznymi, z punktu widzenia informatyki, rozproszonymi systemami czasu rzeczywistego (DRTS – Distributed Real Time System). Mamy tu bowiem do czynienia zarówno z rozproszeniem mocy obliczeniowej i zasobów pamięci jak i z rozproszeniem terytorialnym. Ponadto czas jest parametrem krytycznym, a komunikacja między podprocesami odbywa się za pośrednictwem sieci komputerowej. Natomiast tworzenie oprogramowania aplikacyjnego rezydującego w węzłach systemu jest niczym innym jak budową wielu podsystemów czasu rzeczywistego. Podstawowe pytanie jakie rodzi się w chwili tworzenia takiego systemu, to czy system ów spełni wymagania dotyczące gwarantowanego czasu realizacji wszystkich zadań postawionych przez proces technologiczny, przy jednoczesnym zapewnieniu niezawodności jego pracy.

Metoda „najgorszego przypadku” koncentruje się na odpowiedzi na to podstawowe pytanie, dokonując analizy przyptywu informacji w sieciach przemysłowych [KwiBigMró99]. Celem metody jest wyznaczenie maksymalnego czasu cyklu wymiany informacji w sieciach przemysłowych. Metoda ta bierze pod uwagę następujące elementy:

- typ i rodzaj deterministycznego protokołu dostępu do łącza,
- rodzaje wymian uwzględnione przez protokół (w tym wymiany cykliczne i wyzwalane),
- zjawiska zachodzące na łączu/ styku „koprocessor sieci - medium transmisyjne”,
- zjawiska zachodzące na łączu/ styku „koprocessor sieci – jednostka centralna”,

- czas realizacji programu wykonywanego w jednostce centralnej węzłów.

W metodzie tej, biorąc pod uwagę wyżej wymienione elementy, wyznaczany jest maksymalny czas pojedynczej transmisji (wymiany) pomiędzy dwoma abonentami (węzłami), a następnie uwzględniając liczbę abonentów (węzłów) sieci określa się maksymalny czas realizacji wymian wszystkich danych użytkowych w sieci. Następnie biorąc pod uwagę dodatkowy czas związany z transmisją ramek serwisowych uzyskano zależność na maksymalny czas trwania pojedynczego cyklu wymiany informacji w systemie. Z tak wyznaczonym czasem cyklu sieci utożsamiane jest maksymalne opóźnienie w transmisji danych w systemie.

Jak wynika z rozważań [KwiBigMró99], dla prawidłowej oceny czasu trwania cyklu sieci należy brać pod uwagę, oprócz własności protokołu, co jest oczywiste, również własności koprocatora (jego parametry techniczne), ale także czas realizacji programów aplikacyjnych. W ten sposób metoda „najgorszego przypadku” nie tylko pozwala na precyzyjne określenie maksymalnego czasu trwania pojedynczego cyklu sieci, ale również wskazuje źródła opóźnień, dzięki czemu można poszukiwać rozwiązań generalnie przyspieszających realizację wymian w sieci.

W pracy [Kwi00] przedstawiono rozwinięcie metody analizy najgorszego przypadku o dodatkowe elementy uwzględniające sytuacje, w których mamy do czynienia z odłączeniem lub wadliwą pracą jednego z węzłów systemu. Autor taką sytuację określa jako powstawanie „dziur” w systemie i wykazuje w jaki sposób może to wpływać na parametry czasowe systemu, a w szczególności na wydłużenie cyklu sieci. Rozważania są prowadzone dla sieci przemysłowych, w których węzłami systemu są sterowniki PLC. Rozważania są prowadzone dla sieci przemysłowej o dostępie *master- slave*, *token - ring* oraz *producent - dystrybutor - konsument*.

2.3.2. Wyznaczanie czasu reakcji systemu z wykorzystaniem modelu komunikacyjnego systemu

Tematyka systemów pomiarowo – sterujących o architekturze sieciowej w odniesieniu do których stawiane są wymagania dotrzymania ograniczeń czasowych jest rozpatrywana również w pracach [Mic00][Mic02]. Takie wymagania dotyczą systemów pracujących na obiektach lub procesach technologicznych.

Przedstawiony w pracy [Mic00] model komunikacyjny rozproszonego systemu pomiarowo - sterującego oraz modele zadań realizowanych w tych systemach dla metody dostępu *master - slave* oraz *peer to peer* wraz z elementami teorii szeregowania zadań wykorzystano do planowania zadań realizowanych w systemach pomiarowo – sterujących, w których występują ograniczenia czasowe. Zaproponowana metodologia działania pozwala na sprawdzenie czasu odpowiedzi dla każdego zadania realizowanego w węzłach systemu oraz dla zastosowanego systemu komunikacyjnego.

Dla każdego zadania realizowanego w węzle systemu oraz na magistrali komunikacyjnej istnieje możliwość wyznaczenia minimalnego i maksymalnego czasu odpowiedzi. Sumowanie minimalnych i maksymalnych czasów odpowiedzi dla poszczególnych zasobów systemu jest traktowane jako minimalny i maksymalny czas odpowiedzi systemu.

2.3.3. Sprawdzenie dotrzymania ograniczeń czasowych na magistralach systemów

Sprawdzenie dotrzymania ograniczeń czasowych związanych z przesyłaniem wiadomości przez magistrale komunikacyjne w rozproszonych systemach pomiarowo - sterujących może być przeprowadzone z wykorzystaniem elementów teorii szeregowania zadań stosowanych w

systemach jednoprocessorowych. Takie podejście jest zaprezentowane w pracy [WerŻab99][WerŻab99b]. W związku z tym, że w zależności od metody dostępu do nośnika, nie zawsze jest możliwe zastosowanie metod zarezerwowanych dla systemów jednoprocessorowych w pracy tej przedstawiono modyfikacje rozwiniętych w ostatnim czasie analitycznych metody szeregowania i sprawdzenia spełnienia warunków czasu rzeczywistego dla środowisk scentralizowanych systemów operacyjnych czasu rzeczywistego, aby zastosować je do badania systemów rozproszonych czasu rzeczywistego, a w szczególności do szeregowania wiadomości przesyłanych poprzez sieć.

Po dokonaniu porównania pomiędzy szeregowaniem zadań, a szeregowaniem wiadomości w pracy przedyskutowano prosty model systemu rozproszonego, na podstawie którego został przyjęty model strumienia wiadomości. Jako metodę szeregowania i sprawdzenia spełnienia warunków czasu rzeczywistego wybrano metodę GRMS (Generalized Rate Monotonic Scheduling). Przedstawiono zastosowanie tej metody dla badania spełnienia warunków czasu rzeczywistego dla wiadomości przesyłanych poprzez magistralę stosując metodę *master - slave* w dostępie do medium komunikacyjnego. Powyższe rozważania zostały zobrazowane przykładem obliczeniowym dla magistrali PROFIBUS DP.

Kontynuacja wymienionej wyżej pracy jest przedstawiona w [Żab01]. Prezentowane są kolejne zmodyfikowane metody szeregowania zadań i ich wykorzystanie do szeregowania wiadomości przed ich przesłaniem medium komunikacyjnym. Taką metodykę sprawdzenia dochowania ograniczeń czasowych na magistralach komunikacyjnych zastosowano także dla magistrali o różnych metodach dostępu do nośnika. Przeprowadzono także porównanie czasów odpowiedzi w przypadku zastosowania algorytmów szeregowania zadań w węzłach i bez zastosowania tych algorytmów.

Zarówno prace [WerŻab99] i [Żab01] zawierają postulat, aby w strukturze węzła rozproszonego systemu pomiarowo – sterującego utworzyć dodatkową warstwę, która będzie realizowała określoną metodę szeregowania zadań i w ten sposób umożliwi zastosowanie metod właściwych dla środowisk scentralizowanych w systemach rozproszonych.

Postulat wynika z tego, że stosowanie algorytmu GRMS (lub jakiegokolwiek innego algorytmu szeregowania z priorytetami) jest możliwe tylko wtedy, jeżeli potrafimy zapewnić, iż w danym momencie wysyłana jest wiadomość o najwyższym priorytecie. Systemy sieciowe z reguły dysponują kolejkowaniem wiadomości typu FIFO i dlatego nie zawsze spełniają wymagania algorytmów priorytetowych.

W celu umożliwienia realizacji szeregowania priorytetowego należy pomiędzy warstwę aplikacji, która wytwarza dane do wysłania, a warstwą systemu sieciowego zaimplementować dodatkowe oprogramowanie – program szeregujący [Żab01]. Oprogramowanie to będzie przyjmować od aplikacji dane do wysłania, nadawać priorytety tym danym (według określonego algorytmu) oraz przekazywać je do bufora systemu sieciowego. Dane o aktualnie największym priorytecie będą przekazywane w momencie sygnalizacji przez system sieciowy gotowości do wysłania następnych danych.

Do zalet takiego usytuowania programu szeregującego możemy zaliczyć :

- brak ingerencji w warstwy protokołu sieciowego,
- dane są selekcyjonowane przed przekazaniem ich do bufora sieciowego (istnieje możliwość wyłączenia danych o mniejszym priorytecie przez dane o większym priorytecie),
- w razie konieczności można zmienić program szeregujący na inny.

2.4. Symulacyjne badania magistral komunikacyjnych

W celu określenia własności czasowych magistral komunikacyjnych RSPS przeprowadza się badania symulacyjne wybranych rozwiązań sieci przemysłowych. Wyniki takich badań przeprowadzonych dla sieci przemysłowej o dostępie *peer to peer* (CAN) można znaleźć w pracach [HeyLicRat93] [UpeDea96] [Upe94]. Modele symulacyjne stosowane w tych pracach umożliwiają uzyskanie odpowiedzi na temat czasu opóźnienia w dostępie do medium komunikacyjnego oraz na temat czasu odpowiedzi. W pracy [UpeDea96] zwrócono szczególną uwagę na dobór odpowiedniej szybkości transmisji danych na magistrali komunikacyjnej. Określono także wpływ rodzaju synchronizacji poszczególnych węzłów na średni czas opóźnienia w dostępie do medium komunikacyjnego.

Pojawiają się także publikacje dokonujące porównania właściwości czasowych różnych protokołów komunikacyjnych dla zadanego scenariusza wymian danych jak np. w pracy [BloBor94], gdzie przeprowadzono porównanie protokołów komunikacyjnych Profibus-DP i Interbus-S.

2.5. Podsumowanie

Współczesne RSPS charakteryzują się współużytkowaniem zasobów, z czym wiąże się zmienność opóźnień w transmisji danych od miejsca ich pozyskania do miejsca ich wykorzystania w systemie. Uzyskanie pełnej informacji o zmienności tych opóźnień wymaga wyznaczenia ich histogramów.

Wśród wymienionych metod związanych z badaniem opóźnień w transmisji danych, biorąc pod uwagę charakter uzyskiwanego wyniku końcowego, wyraźnie rysuje się podział na kilka grup. Pierwsza grupa to metody, które w sposób analityczny określają czas najgorszego przypadku [Kwi00][Mic00] i dotyczy to całego systemu, chociaż aparat matematyczny i samo podejście jest w obu przypadkach zupełnie inne. Prace [Żab01] [WerŻab99] również wyznaczają najgorszy przypadek, ale przedmiotem analizy jest tylko magistrala systemu. Wszystkie te metody nie pozwalają na uzyskanie histogramu opóźnień ponieważ zgodnie z metodologią działania w projektowaniu systemów czasu rzeczywistego skupiają się one na wyznaczeniu czasu odpowiedzi w sytuacji najbardziej niekorzystnego dla systemu sposobu aktywacji zadań.

Metody wykorzystujące systemy kolejkowe [Cza99][Fil96] dostarczają odpowiedzi w postaci wartości średnich interesujących nas parametrów, a ich zakres stosowania ogranicza się do sytuacji, które da się opisać w postaci rozkładów wejściowych i rozkładów obsługi o określonych własnościach. W bardziej zaawansowanych przypadkach autorzy wymienionych prac odsyłają do metod symulacyjnych.

Sposób w jaki można wyznaczyć histogramy opóźnień i gęstość prawdopodobieństwa w przypadku, gdy źródłem ich powstawania są własności systemu operacyjnego można znaleźć w pracy [Ham02]. Przedstawiona metoda analityczna dotyczy tylko najprostszych przypadków. Histogramy opóźnień, w bardziej złożonych sytuacjach, można uzyskać wykorzystując modele symulacyjne. W przypadku gdy, system składa się z przetworników pomiarowych i elementów wykonawczych pracujących pod kontrolą systemu operacyjnego w celu wyznaczenia sumarycznego opóźnienia należy dokonać operacji splotu opóźnień cząstkowych uzyskanych w opisany wyżej sposób, co też jest operacją skomplikowaną.

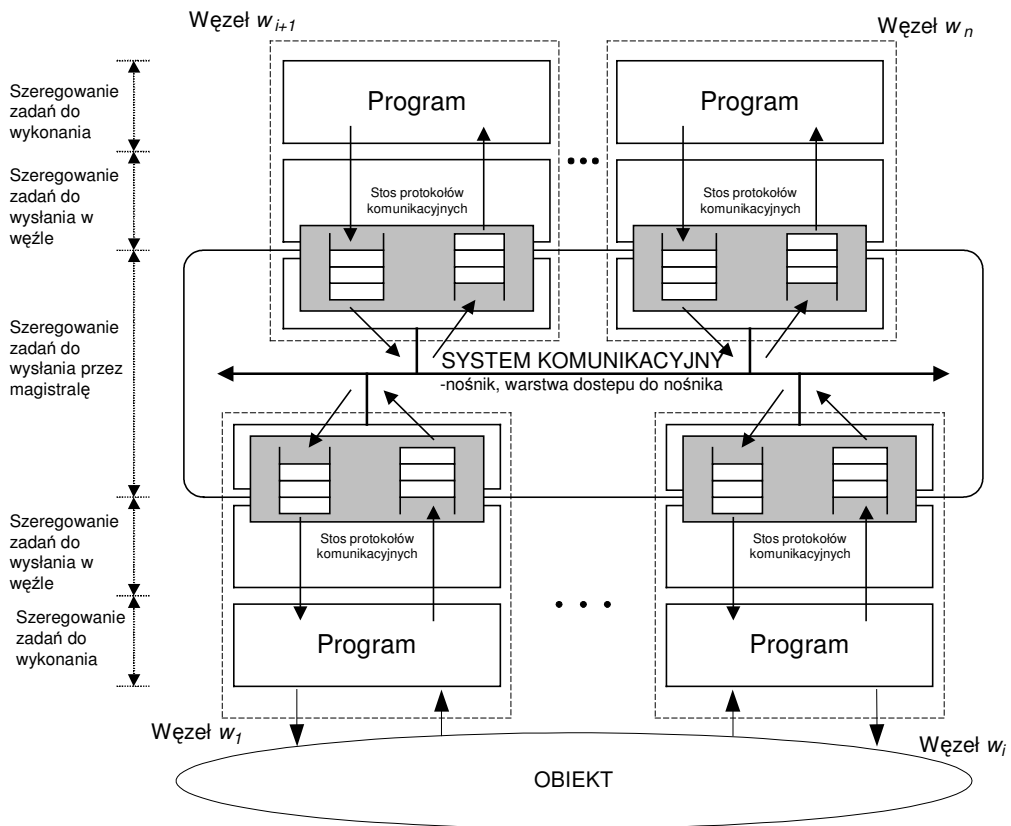
Prace [HeyLicRat93] [UpeDea96] [Upe94] dotyczące badań symulacyjnych magistral komunikacyjnych charakteryzują się fragmentarycznością w podejściu do systemu.

Jak wynika z powyższych rozważań istnieje potrzeba opracowania metody, która umożliwi wyznaczenie histogramu opóźnień w transmisji danych traktując system jako zespół współpracujących ze sobą współużytkowanych elementów. Uwagi zawarte w szeregu prac dotyczące zakresu stosowania metod analitycznych sugerują, aby przyjętymi w pracy metodami były metody symulacyjne. Zdaniem autora punktem wyjścia do budowy modelu symulacyjnego może być przedstawiony w pracy [Mic00] model komunikacyjny systemu, który uwzględnia współużytkowane elementy w strukturze rozproszonego systemu pomiarowo – sterującego.

3. MODEL KOMUNIKACYJNY ROZPROSZONEGO SYSTEMU POMIAROWO – STERUJĄCEGO

3.1. Model komunikacyjny

W pracach [Mic02][Mic05] zaproponowano model komunikacyjny rozproszonego systemu pomiarowo – sterującego, który przedstawiono na rys 3.1. Model zbudowany jest z węzłów połączonych systemem komunikacyjnym. Zazwyczaj przeważająca część węzłów związana jest bezpośrednio z obiektem, natomiast część z węzłów realizuje aplikacje wykorzystując dane pomiarowe dostarczane przez pozostałe węzły. Wyniki przetworzenia danych pomiarowych w tych węzłach mogą być przekazywane na wyższe poziomy systemu informacyjnego firmy, lub w postaci wartości zadanych oraz danych sterujących mogą być przekazywane do węzłów sprzężonych z obiektem.



Rys. 3.1 Model komunikacyjny rozproszonego systemu pomiarowo – sterującego

Na poziomie programu, węzły wykonują zadania związane z realizacją algorytmów, przetwarzaniem danych pomiarowych, przetwarzaniem informacji dwustanowych itp. Zadania są programami wykonywanymi przez mikroprocesor węzła. Zadania wykonywane w węźle są w nim umieszczane przez producenta węzła lub przez użytkownika podczas konfigurowania węzła do pracy w danym systemie. W przeprowadzonych analizach [Mic00][Mic02] przyjęto założenie, że w węźle znajduje się jeden mikroprocesor. Liczba zadań realizowanych przez procesor w węźle może być różna. Zależy ona przede wszystkim od funkcji realizowanych w węźle i sposobu rozwiązania jego algorytmu pracy. Poprawna praca systemu zależy od poprawnej pracy węzłów i systemu komunikacyjnego.

Ważnym elementem węzła jest stos protokołów komunikacyjnych odpowiedzialny za przesłanie informacji pomiędzy warstwą aplikacyjną a system komunikacyjny. W odróżnieniu od poziomu programu zarówno stos protokołów, jak i system komunikacyjny są najczęściej zestandaryzowane. Dane pomiarowe i dane dwustanowe przekazywane są pomiędzy programami realizowanymi w poszczególnych węzłach obiektu przez system komunikacyjny rozproszonego systemu pomiarowo-sterującego i stos protokołów węzłów.

Zadania wykonywane na poziomie systemu komunikacyjnego polegają na przesyłaniu ramek komunikacyjnych i po ich rozpoczęciu nie mogą być wyłączone przez inne zadania. Natomiast zadania wykonywane na poziomie stosu komunikacyjnego, będącego zestawem programów realizujących funkcje komunikacyjne, i na poziomie programu mogą być wyłączone przez zadania o wyższym priorytecie.

Funkcje szeregowania i przełączania zadań są wykonywane przez procesor w określonym czasie i zajmują jego czas, blokując w ten sposób wykonywanie innych zadań. Dla zbioru zadań okresowych, wykonywane przez procesor węzła lub zadań polegających na przesyłaniu ramek przez system komunikacyjny, wyznaczany jest współczynnik u wykorzystania procesora lub systemu komunikacyjnego [Mic02], definiowany jako:

$$u = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i}, \quad (3.1)$$

gdzie:

C_i - czas wykonania i -tego zadania,

T_i - okres występowania i -tego zadania.

Parametry węzła i systemu komunikacyjnego powinny być tak dobrane, aby wartość tego współczynnika była mniejsza od jedności. Jest to podstawowy warunek realizowalności zadań przez procesor lub system komunikacyjny.

Model komunikacyjny uwzględnia wszystkie współużytkowane elementy w strukturze RSPS jakimi są mikroprocesory w węzłach systemu, procesory komunikacyjne węzłów wraz z buforami danych do wysłania oraz magistralę komunikacyjną systemu. W elementach tych powstają najistotniejsze opóźnienia, występujące podczas przesyłania danych pomiarowych pomiędzy węzłami w RSPS, ponieważ są wnoszone przez współużytkowane komponenty systemu i w każdej wymianie danych mogą być inne.

W modelu uwzględnione są opóźnienia związane z wykonaniem i szeregowaniem zadań, które występują na poziomie programu realizowanego 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 także opóźnienia związane z buforowaniem i szeregowaniem danych, które powstają podczas oczekiwania danych przed wysłaniem ich na magistralę komunikacyjną. Oba wymienione szeregowania realizowane są 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 przypadku standardu sieci przemysłowej.

3.2. Model zadania systemu

Zadanie z_i realizowane w węźle w_n (lub zadanie realizowane na magistrali komunikacyjnej systemu) może być scharakteryzowane przez trzy następujące parametry:

- okres występowania zadania T_i ,
- względne ograniczenie czasowe zadania D_i , (odniesione do chwili wystąpienia żądania wykonania zadania z_i),
- czas wykonania zadania C_i (w analizach uwzględniany jest najgorszy przypadek czasu wykonania).

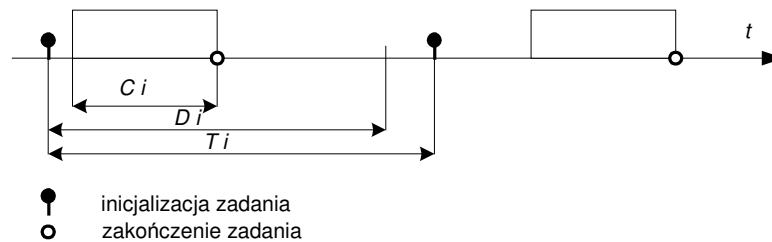
Ograniczenie czasowe zadania oznacza limit czasu, przed upływem którego procesor powinien zakończyć wykonanie zadania. Zwykle względne ograniczenie czasowe zadania jest mniejsze lub równe okresowi występowania zadania.

Okres występowania zadania T_i , czas jego wykonania C_i , oraz ograniczenie czasowe D_i powinny spełniać warunek

$$C_i < D_i \leq T_i. \quad (3.2)$$

Parametry czasowe zadania okresowego przedstawiono na rys. 3.2.

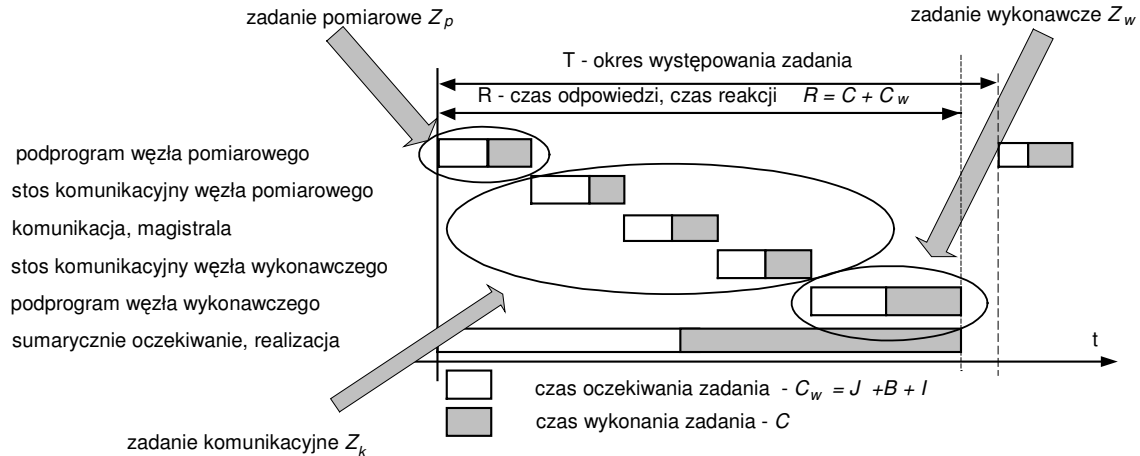
W przypadku występowania zadań sporadycznych w prowadzonych analizach zadania te są uwzględniane, ale są one traktowane tak jak zadania okresowe, o okresie równym minimalnemu czasowi pomiędzy kolejnymi wystąpieniami tego samego zadania sporadycznego.



Rys 3.2. Parametry czasowe zadania okresowego

Podstawę do konstrukcji modelu zadania w systemie pomiarowo - sterującym stanowią przedstawione na rys. 3.2 parametry czasowe zadania okresowego [Mic02], które dla tego typu zadania są identyczne. Dodatkowo w odróżnieniu od zadań realizowanych w poszczególnych węzłach i na magistrali systemu do określenia modelu zadania wykonywanego przez system należy wziąć pod uwagę wszystkie sytuacje, które mogą wystąpić podczas pracy systemu na poszczególnych jego poziomach. Zatem w celu zbudowania modelu zadania systemu uwzględniającego dodatkowe uwarunkowania występujące w systemie rozpatrzono elementarny model rozproszonego systemu pomiarowo - sterującego przedstawiony na rys 1.2. zawierający tylko dwa węzły. Dla takiego najprostszego modelu systemu i przy uwzględnieniu modelu komunikacyjnego systemu otrzymano model dla zadania okresowego, który jest przedstawiony na rys. 3.3. Czas oczekiwania C_w zadania z_i na jego wykonanie jest konsekwencją ograniczonych możliwości zasobów wykorzystywanych w danym miejscu RSPS oraz braku synchronizacji pomiędzy zdarzeniami występującymi w obiekcie i zadaniami wykonywanymi przez procesor węzła i procesor komunikacyjny. Wartość czasu oczekiwania C_w jest sumą trzech składowych, czasu blokowania B zadania z_i przez zadania o niższym priorytecie, czasu interferencji I

określającego czas potrzebny na wykonanie zadań o wyższym priorytecie, które mogą pojawić się podczas wykonywanego zadania oraz czasu J (ang. jitter) określającego przedział rozpoczęcia realizacji zadania gotowego do wykonania. W warunkach rzeczywistych wartość czasu oczekiwania ma wpływ na czas odpowiedzi na zdarzenia i zmienia się w pewnych granicach. Precyzyjne oszacowanie wartości zakresu zmian czasu oczekiwania na etapie projektowania systemu jest niezbędne do oceny przydatności projektowanego systemu i do zestrojenia parametrów obiektu. Potrzeba przeprowadzenia takich analiz występuje zwłaszcza w przypadku projektowania systemów, w których występują ograniczenia czasowe.



Rys. 3.3. Model zadania

Minimalna wartość czasu opóźnienia lub czasu reakcji R na zdarzenie jest równa sumie czasów wykonania zadań na poszczególnych poziomach. Maksymalna wartość czasu opóźnienia jest sumą maksymalnych wartości czasów oczekiwania i czasów wykonania zadania. Jak już wspomniano czasy oczekiwania na poszczególnych poziomach systemu można wyznaczyć z wykorzystaniem elementów teorii szeregowania zadań.

Czas wykonania C na każdym z trzech poziomów RSPS jest najczęściej różny i zależy od wielu czynników. Na poziomie procesora węzła zależy od typu procesora, jego zegara i złożoności obliczeniowej realizowanych algorytmów. Na poziomie systemu komunikacyjnego czas wykonania zadania zależy od prędkości transmisji, długości pola danych i metody kodowania. Dla danego urządzenia i systemu komunikacyjnego czasy wykonania zadań można traktować odpowiednio jako parametr urządzenia i parametr systemu komunikacyjnego.

Przy założeniu, że jedno z zadań dowolnego węzła systemu pozyskuje dane pomiarowe, na podstawie których jedno z zadań dowolnego innego węzła systemu wykonuje sterowanie elementem wykonawczym, zadanie systemu jest trójką powiązanych ze sobą zadań. W skład trójki zadań tworzących zadanie systemu zalicza się: zadanie pomiarowe $z_{p_{ij}}$ (i – nr zadania realizowanego w j - tym węźle), zadanie komunikacyjne z_{k_p} (p – nr zadania komunikacyjnego) i zadanie wykonawcze $z_{w_{mn}}$ (m – nr zadania realizowanego w n – tym węźle) (rys. 3.3). Na pojedynczą realizację zadania systemu składa się pojedyncza realizacja trzech wymienionych zadań składowych.

3.3. Planowanie wykonania zadań

3.3.1. Zasady przydzielania priorytetu zadaniom

W celu zaplanowania wykonywania zadań w systemach pomiarowo – sterujących można wykorzystać, po pewnych modyfikacjach, elementy teorii szeregowania zadań stosowane do planowania wykonania zadań w systemach operacyjnych. Szeregowanie obejmuje alokację czasu i zasobów dla zadania, w taki sposób, że wymagania czasowe lub inne wymagania wydajnościowe są spełnione. Podstawowym celem analizy szeregowania zadań jest formalne wykazanie, że realizowane zadania o znanych parametrach zostaną wykonane w każdych warunkach i w zadanym czasie. Często stosowaną metodą szeregowania zadań jest przydzielanie każdemu zadaniu priorytetu. Przy takim szeregowaniu zadań, w danej chwili jest uruchamiane zadanie o najwyższym priorytecie.

Najczęściej wykorzystywaną zasadą przydziału priorytetu danemu zadaniu jest uwzględnianie okresu jego występowania według zasady: *krótszy okres występowania wyższy priorytet* tzn. jeżeli $T_i < T_j$ to $P_i > P_j$. Stosowanie tej zasady wynika z tego, że zadania występujące częściej zazwyczaj są ważniejsze od zadań występujących rzadziej. Ponadto, ograniczenia czasowe i/lub najgorszy przypadek czasu odpowiedzi dla zadań występujących częściej są krótsze, co dodatkowo uzasadnia stosowanie tej zasady. Taki sposób przydziału priorytetu określany jest jako *Rate Monotonic (RM)*.

Priorytet może być przydzielany na podstawie względnego ograniczenia czasowego według zasady: *mniejsza wartość ograniczenia czasowego, większy priorytet* tzn. $D_i < D_j$ to $P_i > P_j$. Ten sposób przydziału priorytetu określany jest jako *Deadline Monotonic (DM)*.

Jeżeli priorytety przypisywane poszczególnym zadaniom zgodnie z zasadą RM lub DM nie są zmieniane podczas pracy systemu, to uważa się je za systemy ze statycznym przydziałem priorytetu. Jeżeli w trakcie pracy systemu priorytet przypisywany zadaniu może zostać zmieniony, to systemy te nazywamy systemami z dynamicznym przydziałem priorytetu. Przykładem systemu z dynamicznym przydziałem priorytetu jest system wykorzystujący zasadę EDF (ang. *earliest deadline first*), zgodnie z którą najwyższy priorytet przydzielany jest zadaniu, któremu najwcześniej kończy się ograniczenie czasowe.

W systemach z dynamicznym przydziałem priorytetu zadaniom, przydzielenie priorytetu i wysłanie zadania do wykonania jest realizowane wówczas kiedy pojawia się nowe zadanie do wykonania lub jeżeli kończy się wykonanie aktualnie wykonywanego zadania. Zaletą metody dynamicznego przydziału priorytetu EDF, w porównaniu do metod statycznego przydziału priorytetu (RM, DM) jest lepsze wykorzystanie procesora [Mic00]. Jej wadą jest większe obciążenie procesora zadaniami szeregowania podczas pracy.

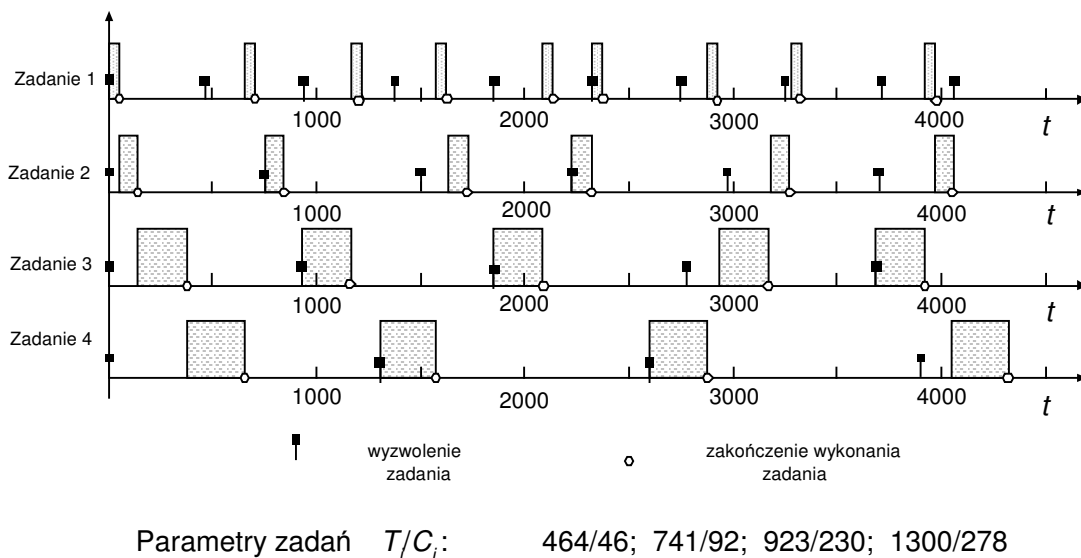
3.3.2. Systemy z wywłaszczaniem i bez wywłaszczania

Systemy wykorzystujące do planowania kolejności wykonywanych zadań mechanizmy priorytetu można podzielić na systemy z wywłaszczaniem i bez wywłaszczania. W systemach z wywłaszczaniem, zadania z wyższym priorytetem odbierają procesor zadaniami z niższym priorytetem. W systemach bez wywłaszczania, pojawienie się zadania o wyższym priorytecie nie przerywa wykonywania zadania o niższym priorytecie. Zadanie o wyższym priorytecie jest wykonywane dopiero po zakończeniu wykonania zadania o niższym priorytecie. W tej sytuacji mamy do czynienia z inwersją priorytetu, która oznacza, że do czasu wykonywania zadania o niższym priorytecie, wykonanie zadania o wyższym priorytecie jest blokowane przez zadanie o priorytecie niższym.

W odniesieniu do przedstawionego wcześniej modelu komunikacyjnego systemu technikę wyłuszczenia realizowanych zadań można stosować jedynie na poziomie programu. Ze względu na uwarunkowania wynikające z rozwiązań stosowanych na poziomie stosu komunikacyjnego i na poziomie systemu komunikacyjnego nie ma możliwości stosowania tej metody szeregowania zadań. Na wymienionych poziomach stosuje się jedynie rozwiązania bez wyłuszczenia zadań.

Na etapie projektowania systemów pomiarowo – sterujących, którym stawiane są wymagania czasu rzeczywistego należy formalnie wykazać, że podczas pracy wszystkie ograniczenia czasowe stawiane poszczególnym zadaniom zostaną spełnione. Stosowanie rozwiązań bazujących na intuicji i doświadczeniu może być skuteczne, ale jedynie w przypadku bardzo prostych i niezbyt rozbudowanych systemów i o niezbyt wygórowanych ograniczeniach czasowych. Dla systemów złożonych o dużej liczbie zadań i wygórowanych ograniczeniach czasowych, których nie dotrzymanie może spowodować skutki katastroficzne, wykonanie wstępnych analiz czasowych bazujących na modelach formalnych jest niezbędne.

Na rys. 3.4 przedstawiono w jakiej kolejności będą realizowane przez procesor 4 cykliczne zadania w przypadku zastosowania do szeregowania zadań metody RM bez mechanizmu wyłuszczenia zadań. Na rysunku podano także parametry czasowe zadań.



Rys. 3.4. Ilustracja metody RM bez wyłuszczenia

Brak mechanizmu wyłuszczenia zadań powoduje, że rozpoczęcie realizacji zadania o najwyższym priorytecie (zadanie 1 rys. 3.4) następuje w każdym wyzwoleniu z różnym opóźnieniem. Opóźnienie to jest spowodowane koniecznością zakończenia realizacji aktualnie wykonywanego zadania pomimo tego, że jest to zadanie o niższych priorytecie.

3.3.3. Szeregowanie zadań metodą RM ze stałym przypisaniem priorytetu z wyłuszczeniem zadań

Dla przypisania priorytetu zgodnie z metodą RM, wprowadzono następujący warunek pozwalający na weryfikację spełnienia warunków RT (*Real Time*) i gwarantujący, że N zadań zostanie wykonanych przed upływem ich ograniczenia czasowego [LiuLay73]:

$$\sum_{i=1}^N \frac{C_i}{T_i} \leq N(2^{1/N} - 1), \quad (3.3)$$

gdzie: C_i jest maksymalnym czasem wykonania i -tego zadania a T_i jest okresem jego występowania (w odniesieniu do zadań sporadycznych T_i jest minimalnym czasem pomiędzy kolejnymi wystąpieniami zadania).

Przyjęto założenie, że ograniczenie czasowe jest równe okresowi występowania zadania. Takie założenie jest naturalnym i najczęściej przyjmowanym założeniem podczas analiz dotrzymania ograniczeń czasowych w projektowanych systemach czasu rzeczywistego.

Warunek (3.3) dotyczy niezależnych zadań ze względny ograniczeniem czasowym równym okresowi występowania zadania, przy założeniu, że zadania mogą być wyłączone.

Ze względu na często występujące powiązania pomiędzy zadaniami realizowanymi w węzłach RSPS, duże znaczenie praktyczne mogą mieć wyniki analiz uwzględniające występujące w systemie powiązania. W przypadku występowania zadań zależnych, warunek (3.3) staje się łagodniejszy, ponieważ w prawidłowo funkcjonującym systemie nie powinna wystąpić sytuacja, w której aktywne są wszystkie zadania. Wynika to z sekwencji następujących po sobie zadań, a więc spełnienie warunku (3.3) jest łatwiejsze do osiągnięcia.

3.3.4. Szeregowanie zadań metodą RM ze stałym przypisaniem priorytetu bez wyłączenia zadań

Analiza dotrzymania warunków czasu rzeczywistego w systemach bez wyłączenia zadań ma w przypadku RSPS duże znaczenie praktyczne, ponieważ taka sytuacja występuje na poziomie systemu komunikacyjnego i obsługi stosu protokołowego w zdecydowanej większości sieci miejscowych (ang. *Fieldbus*) stosowanych do przesyłania informacji w sieciowych systemach pomiarowo - sterujących.

W systemach bez wyłączenia zadań mogą wystąpić sytuacje, w których zadania o niższym priorytecie blokują zadania o wyższym priorytecie, które pojawiły się po rozpoczęciu wykonywania zadania o niższym priorytecie. Oznaczając przez B_i maksymalny czas blokowania zadania i nierówność (3.3) można zmodyfikować do postaci:

$$\sum_{i=1}^i \left(\frac{C_i}{T_i} \right) + \frac{B_i}{T_i} \leq i(2^{1/i} - 1), \forall_{i, 1 \leq i \leq N} \quad (3.4)$$

Przyjmując, że zadania są niezależne, maksymalny czas blokowania danego zadania przez zadania o niższym priorytecie wyznaczany jest w następujący sposób:

$$\begin{cases} B_i = 0, & \text{jeżeli } P_i = \min \{P_j\} \text{ dla } j=1, \dots, N \\ B_i = \max \{C_j\}, j \in lp(i) & \text{jeżeli } P_i \neq \min \{P_j\} \text{ dla } j=1, \dots, N \end{cases} \quad (3.5)$$

gdzie: P_i oznacza priorytet zadania i taki że, $\forall_{i < N} P_{i+1} \leq P_i$, oraz $lp(i)$ oznacza zbiór zadań o priorytecie niższym niż priorytet zadania i .

Nierówność (3.4) można uprościć do prostszej postaci obliczeniowej, która daje bardziej pesymistyczne wyniki (nakłada większe wymagania na spełnienie ograniczeń czasowych).

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{C_i}{T_i} \right) + \max_{i, 1 \leq i \leq N} \left\{ \frac{B_i}{T_i} \right\} \leq i(2^{1/N} - 1), \forall_{i, 1 \leq i \leq N} \quad (3.6)$$

Przedstawione powyżej nierówności (3.4, 3.5 i 3.6) nie uwzględniają takich sytuacji występujących w sieciach przemysłowych (uszkodzenie lub nieaktywność węzła, do którego przesyłana jest informacja, wpływ zewnętrznych zakłóceń na zawartość przesyłanej informacji), które wymagają retransmisji wiadomości. Dysponując przewidywaną lub

ustaloną na podstawie obserwacji stopą błędów można określić przewidywaną liczbę powtórzeń ν , wówczas nierówność (3.6) można zmodyfikować do następującej postaci:

$$\nu * C_r + \sum_{i=1}^N \left(\frac{C_i}{T_i} \right) + \max_{i, 1 \leq i \leq N} \left\{ \frac{B_i}{T_i} \right\} \leq i(2^{1/N} - 1), \forall_{i, 1 \leq i \leq N}, \quad (3.7)$$

gdzie: C_r jest maksymalnym czasem trwania powtarzanego zadania.

W rzeczywistych systemach, na poziomie systemu komunikacyjnego wartości takich parametrów jak C_i , B_i oraz C_r zależą od wybranego protokołu komunikacyjnego i jego parametrów np. od prędkości transmisji. Na poziomie warstwy aplikacji wartości wymienionych parametrów zależą głównie od zastosowanego mikroprocesora, wartości jego zegara i od systemu operacyjnego.

3.3.5. Szeregowanie zadań metodą RM - czas odpowiedzi w systemach z wywłaszczaniem zadań

Czas odpowiedzi na zdarzenia jest jednym z podstawowych parametrów RSPS. Jego znaczenie uwidacznia się zwłaszcza w tych systemach, w których istotne jest dotrzymanie warunków czasu rzeczywistego.

Potrzeba projektowania przewidywalnych RSPS, tzn. takich, w odniesieniu do których można na etapie projektowania określić jego parametry i przewidzieć jego zachowanie się w sytuacjach krytycznych (najgorszy przypadek) wymaga stosowania takiej metodyki postępowania, która zapewni osiągnięcie żądanych parametrów na drodze formalnej. W tym celu opracowane zostały zależności wspomagające proces projektowania [Mic00]. W RSPS analiza jego parametrów może dotyczyć poszczególnych węzłów, systemu komunikacyjnego oraz całego systemu obejmującego zarówno węzły jak i system komunikacyjny.

Dowiedziano [AudBurRicTinWel97], że najbardziej niekorzystną sytuacją dla oszacowania czasu odpowiedzi R_i zadania i jest synchroniczne, jednoczesne uaktywnienie wszystkich zadań z ich maksymalną częstotliwością występowania. Podstawowa zależność na wyznaczenie czasu R_i jest zdefiniowana następująco:

$$R_i = I_i + C_i, \quad (3.8)$$

gdzie: I_i jest maksymalnym czasem interferencji zadania i w przedziale czasu $[t, t+R_i]$.

Maksymalny czas interferencji I_i określa jaka ilość czasu potrzebna jest na wykonanie zadań o wyższym priorytecie niż zadanie i , w powyżej określonym przedziale. Maksymalną wartość czasu interferencji dla danego zadania i uzyskuje się dla przypadku, kiedy jednocześnie aktywne staną się wszystkie zadania o priorytecie wyższym niż priorytet zadania i . Dla uproszczenia analiz, bez utraty ogólności rozważań, można przyjąć, że zadania te stają się aktywne (gotowe do wykonania) w chwili $t=0$.

Niech zadanie j o czasie wykonania C_j posiada priorytet P_j , a zadanie i priorytet P_i . Jeżeli priorytet P_j zadania j jest wyższy niż priorytet P_i zadania i , to w przedziale czasu $[0, R_i)$ zadanie j będzie wykonywane R_i / T_j razy. Przy założeniu, że w chwili $t = 0$ uaktywnione zostało również zadanie i , to maksymalny czas interferencji możemy określić z następującej zależności:

$$I_i = \sum_{j \in hp(i)} \left(\left\lceil \frac{R_i}{T_j} \right\rceil C_j \right), \quad (3.9)$$

gdzie: $hp(i)$ oznacza zbiór zadań o priorytecie wyższym od zadania i .

Wykorzystując równania (3.8) i (3.9) dochodzi się do równania rekurencyjnego:

$$R_i^{n+1} = \sum_{j \in hp(i)} \left(\left[\frac{R_i^n}{T_j} \right] C_j \right) + C_i, \quad (3.10)$$

gdzie: n jest kolejnym krokiem iteracji.

Rozwiązanie równania rekurencyjnego uzyskujemy jeżeli $R_i^{n+1} = R_i^n$. Jeżeli zadania $1...N$ uszeregowane są według rosnącego priorytetu i są niezależne, to liczba kroków iteracji, po której uzyskujemy rozwiązanie jest równa $(N-i)+1$. Iterację rozpoczynamy przyjmując $R_i^0=0$. W pierwszym kroku iteracji uzyskujemy minimalną wartość czasu odpowiedzi R_{imin} , która jest równa czasowi C_i wykonania zadania i . Sytuacja taka występuje jeżeli w czasie wykonywania zadania i nie pojawi się żadne zadanie o priorytecie wyższym od zadania i . Jeżeli wynik rekurencji jest zbieżny do okresu T_i występowania zadania i lub przekroczy jego wartość to zadanie nie jest szeregowealne.

Podobny sposób postępowania stosuje się do analizy dotrzymania ograniczeń czasowych w metodzie DM, w której priorytet zadań nie zależy od częstości ich występowania lecz od wartości ograniczenia czasowego nałożonego na dane zadanie. Jeżeli wynik przeprowadzonej analizy czasu odpowiedzi R_i dla zadania i przekroczy ograniczenie czasowe D_i dla tego zadania, to oznacza to, że zadanie to nie jest szeregowealne tzn. że istnieje możliwość wystąpienia sytuacji, w której nie będzie możliwe wykonanie zadania przed upływem jego ograniczenia.

3.3.6. Szeregowanie zadań metodą RM - czas odpowiedzi w systemach bez wywłaszczania zadań

W systemach pracujących bez wywłaszczania zadań, podstawowym zagadnieniem jest uwzględnienie w prowadzonych analizach skutków inwersji priorytetu, polegające na blokowaniu zadań z wyższym priorytetem przez zadania o niższym priorytecie. Wyniki tych analiz mają bezpośrednie zastosowanie do analizy systemu komunikacyjnego i stosu protokołowego sieciowego systemu pomiarowo - sterującego, w którym zastosowano protokoły komunikacyjne ze zdecentralizowanym dostępem do magistrali czyli protokoły klasy *peer to peer*. Popularnymi przedstawicielami protokołów tej klasy są: CAN, LonWorks, Modbus Plus, Profibus (tylko węzły aktywne). Uwzględniając czynnik blokowania, wyrażenie (3.10) na najgorszy przypadek czasu odpowiedzi przyjmie następującą postać:

$$R_i^{n+1} = B_i + \sum_{j \in hp(i)} \left(\left[\frac{R_i^n}{T_j} \right] C_j \right) + C_i, \quad (3.11)$$

gdzie: B_i jest wyznaczany w następujący sposób:

$$\begin{cases} B_i = 0, & \text{jeżeli } P_i = \min \{P_j\} \text{ dla } j=1, \dots, N \\ B_i = \max \{C_j\}, j \in lp(i) & \text{jeżeli } P_i \neq \min \{P_j\} \text{ dla } j=1, \dots, N \end{cases}, \quad (3.12)$$

gdzie: P_i oznacza priorytet zadania i taki że, $\forall_{i < N} P_{i+1} \leq P_i$, (zadania są uszeregowane według malejącego priorytetu) oraz $lp(i)$ oznacza zbiór zadań o priorytecie niższym niż priorytet zadania i .

Przedstawiona charakterystyka metod szeregowania zadań opracowywanych na potrzeby analizy dotrzymania ograniczeń czasowych i określania warunków realizowalności w typowych komputerach jednoprocessorowych może być wykorzystana do prowadzenia analiz dotrzymania ograniczeń czasowych i do wyznaczania czasu reakcji na zdarzenia w RSPS, w

których wymagane jest dotrzymanie warunków czasu rzeczywistego. Do analizy właściwości komunikacyjnych na poziomie systemu komunikacyjnego (warstwa łączenia danych i warstwa fizyczna) mogą zostać wykorzystane metody szeregowania zadań bez wyłączenia, natomiast na poziomie stosu protokołowego (od warstwy sieciowej do warstwy aplikacji) i na poziomie aplikacji użytkownika mogą być wykorzystane pozostałe metody planowania wykonania zadań.

Wykorzystując wyniki analiz szeregowania zadań przedstawione w tym punkcie, projektant RSPS, w którym priorytet wykonywanym zadaniom przypisywany jest zgodnie z metodą RM lub DM, może w sposób optymalny dobrać parametry poszczególnych elementów systemu, ocenić graniczne jego możliwości i wyznaczyć jego oceny jakościowe.

W danym węźle na każdym z poziomów mogą być stosowane różne metody szeregowania zadań do wykonania. W najprostszym przypadku jeżeli na poziomie procesora węzła wykonywane jest jedynie jedno zadanie okresowe, to wybór metody jest prosty i nie ma on dużego wpływu na osiągnięte wyniki. Wzrost liczby realizowanych zadań w procesorze węzła czyni wybór metody szeregowania zadań do wykonania znacznie trudniejszym i mającym wpływ na dotrzymanie ograniczeń czasowych stawianym poszczególnym zadaniom.

3.4. Posumowanie

Przedstawiony model komunikacyjny rozproszonego systemu pomiarowo - sterującego oraz model zadania realizowanego w tych systemach, wraz z elementami teorii szeregowania zadań wykorzystano do planowania zadań realizowanych w RSPS, w których występują ograniczenia czasowe. Zaproponowana metodologia działania pozwala na sprawdzenie czasu odpowiedzi dla każdego zadania realizowanego w węzłach systemu oraz dla zastosowanego systemu komunikacyjnego.

Przedstawiony model komunikacyjny przez to, że w swojej strukturze uwzględnia wszystkie współużytkowane zasoby występujące w rozproszonym systemie pomiarowo - sterującym posłużył jako punkt wyjścia do opracowania modelu symulacyjnego takiego systemu.

4. METODY SYMULACJI

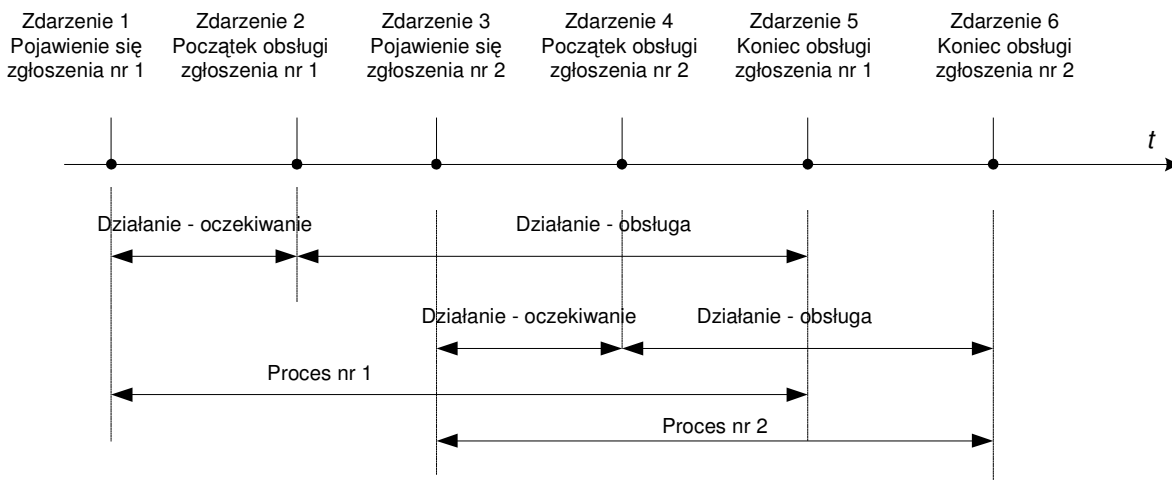
4.1. Wprowadzenie

Symulacja cyfrowa jest algorytmiczną metodą prowadzenia (za pomocą maszyny cyfrowej) eksperymentów na modelach dynamicznych istniejących lub projektowanych systemów [Tys90]. System jest zbiorem powiązanych ze sobą obiektów charakteryzowanych odpowiednimi atrybutami. Jeżeli każdemu atrybutowi obiektu przyporządkujemy pewną zmienną, to system można opisać zbiorem zmiennych w taki sposób, że każda sensowna kombinacja wartości zmiennych odpowiada określonemu stanowi systemu. Przenoszenie systemu ze stanu do stanu zgodnie z określonymi zasadami jest symulacją, czyli odtwarzaniem zachowania się systemu w czasie.

Zmiany stanu systemu czyli zmiany wartości zmiennych reprezentujących atrybuty obiektów mogą być ciągłe lub dyskretne. W związku z tym wyróżnia się symulację cyfrową systemów ciągłych oraz symulację cyfrową systemów dyskretnych. W systemach dyskretnych zmianę stanu systemu nazywa się zdarzeniem stąd symulacje systemów dyskretnych określa się także jako symulacje systemów zdarzeń dyskretnych [Tys90] [Gaj01].

Odtworzenie przebiegu procesów w symulowanym systemie wymaga wprowadzenia wewnętrznej rachuby czasu, określanej jako czas systemowy lub czas symulacyjny. Istnieją dwie zasadnicze metody symulacji upływu czasu systemowego [Tys90][Bin02]. W pierwszej, po powiększeniu wartości zmiennej zegarowej o stały przyrost Δt , sprawdza się możliwość wystąpienia poszczególnych zdarzeń w wyznaczonej w ten sposób chwili. Technikę stałego kroku trudno efektywnie zastosować w symulacji systemów, w których odstępy czasów między kolejnymi zdarzeniami mają charakter losowy. Wówczas bardziej elastyczna jest metoda aktualizacji czasu oparta na koncepcji następnego zdarzenia. Istotą tej metody stanowi spostrzeżenie, że między zdarzeniami stany obiektów systemu nie ulegają zmianie, a więc nie wymagają obserwacji. Każdorazowo w chwili wystąpienia kolejnego zdarzenia dokonuje się przesunięcia czasu systemowego do chwili, w której wystąpi następne zdarzenie, a więc będą możliwe dalsze zmiany stanu systemu.

Podstawą porównawczą metod symulacji zdarzeń dyskretnych jest sposób organizacji obliczeń symulacyjnych i odwzorowanie w metodach trzech podstawowych elementów modeli: zdarzenia, procesu i działania. Różnice pomiędzy zdarzeniem, działaniem, a procesem przedstawiono na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Różnice pomiędzy zdarzeniem, działaniem, a procesem

Zdarzenie jest zmianą stanu systemu zachodzące w określonym punkcie czasu. Może to być zmiana atrybutów obiektów wyróżnionych w systemie, bądź też wprowadzenie/kasowanie nowych obiektów (zgłoszeń). Działanie jest zbiorem operacji, w wyniku których ulegają zmianie stany systemu. Działanie rozpoczyna i kończy się zdarzeniem. Proces jest chronologicznie (w czasie) uporządkowanym zbiorem zdarzeń związanych z każdym pojedynczym zgłoszeniem w systemie od chwili jego pojawienia się w systemie do chwili jego zaniku w systemie. Proces składa się z działań natomiast działanie jest określane poprzez zdarzenia.

Rozróżnia się dwa typy zdarzeń: zdarzenia bezwarunkowe, jako zdarzenia bezpośrednio zależne od czasu oraz zdarzenia warunkowe, jako zdarzenia pośrednio zależne od czasu i wyznaczane stanami systemu.

W konstrukcji modelu systemu zdarzeń dyskretnych wyróżnić można następujące elementy:

- zegar systemu – rejestrujący i odzwierciedlający upływ czasu systemu rzeczywistego,
- kalendarz systemu – zawierający zbiór informacji o mających wystąpić zdarzeniach (termin wystąpienia zdarzenia, typ zdarzenia, parametry zdarzeń),
- zasoby systemu - obiekty statyczne systemu (jednokanałowe, wielokanałowe stanowiska obsługi).

Wyróżnić można trzy metody modelowania i symulacji zdarzeń dyskretnych [Tys90]:

- planowania zdarzeń,
- przeglądania działań,
- interakcji procesów.

Każda z tych metod posiada swoje specyficzne cechy co wpływa na ich obszar zastosowań. Metoda planowania zdarzeń przeznaczona jest do symulacji systemów, w których występuje duża liczba zgłoszeń. Metoda przeglądania działań znajduje zastosowanie w modelowaniu systemów z dużą liczbą działań. Metoda interakcji procesów może być zastosowana do symulacji systemów, w których wszystkie działania można połączyć w procesy. W pracy uwzględniono dwie pierwsze metody. W związku z tym, że realizacja części zadań w systemie nie znajduje swojego zakończenia, oraz część realizowanych zadań ma charakter lokalny nie obejmujący całego systemu nie zrealizowano modelu symulacyjnego metodą interakcji procesów.

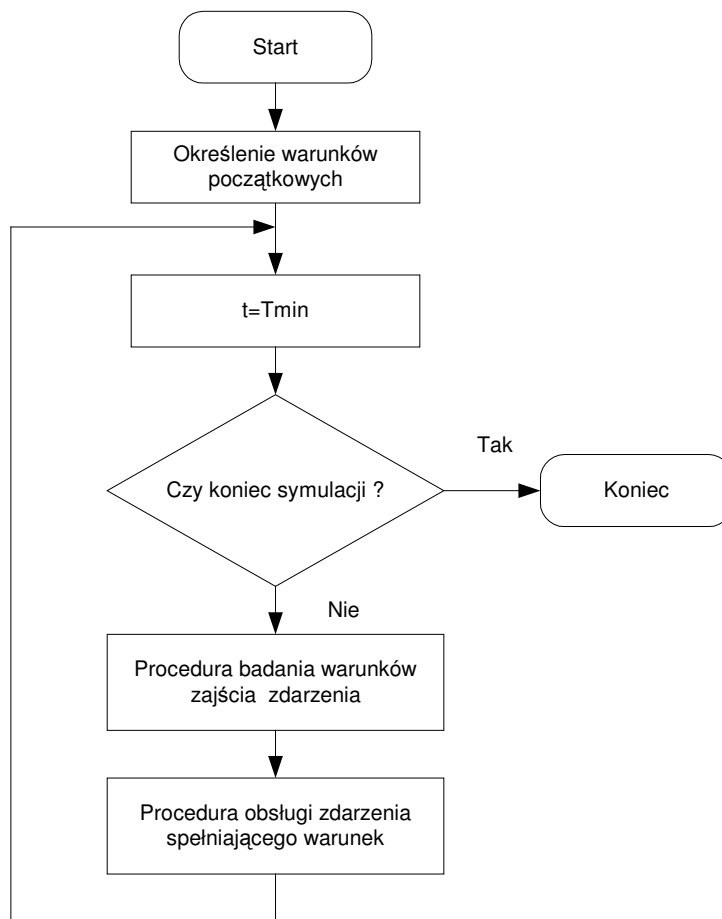
4.2. Metoda przeglądania działań

Metoda przeglądania działań (ang. activity oriented discrete simulation) polega na rozpatrywaniu wszystkich działań systemu celem określenia, które z nich z chwilą zajścia określonego zdarzenia powinny być rozpoczęte, a które zakończone. Oznacza to:

- wprowadzenie do kalendarza zdarzeń bezwarunkowych bezpośrednio zależnych od czasu oraz zdarzeń warunkowych,
- rozpatrywanie czynności związanych ze zdarzeniami warunkowymi niezależnie od wystąpienia zdarzeń bezwarunkowych,
- sterowanie przebiegiem symulacji w oparciu o listę warunków, jakie powinny być spełnione by zaszło w systemie określone zdarzenie.

Wprowadzenie zdarzeń w systemie odbywa się poprzez cykliczne sprawdzenie listy warunków jakie powinny być spełniane przy zachodzeniu zdarzeń [Tys90].

Algorytm przebiegu symulacji modelu zbudowanego w oparciu o metodę przeglądania działań przedstawiono na rys. 4.2. Po ustaleniu warunków początkowych systemu należy przesunąć czas systemu do chwili T_{min} , w której zajdzie najbliższe zdarzenie. Po sprawdzeniu warunku końca symulacji należy wykonać badanie listy warunków wystąpienia zdarzeń dla chwili czasu systemu T_{min} . Jeżeli dla określonego zdarzenia spełnione są warunki jego zajścia, to oznacza to, że doszło do zajścia tego zdarzenia i należy wykonać procedurę czynności związanych z tym zdarzeniem (obsługi zdarzenia). Powyższe czynności ulegają powtórzeniu z badaniem warunku zakończenia obliczeń symulacyjnych.



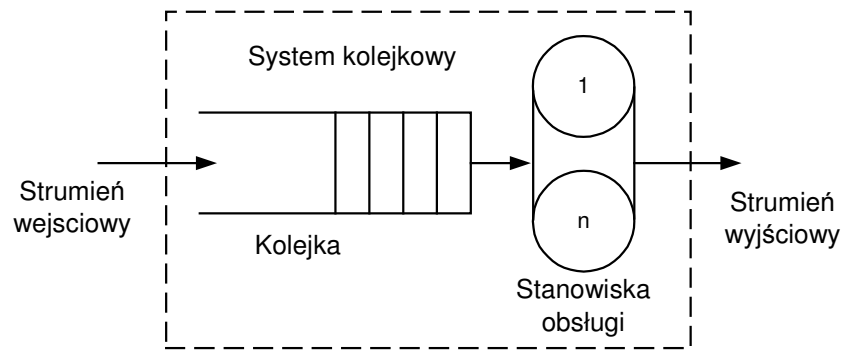
Rys. 4.2. Algorytm przebiegu symulacji w metodzie przeglądania działań

W celu ilustracji działania metody opisano przedstawiony na rys. 4.3 wielokanałowy otwarty system obsługi z n stanowiskami obsługi.

W systemie tym zdarzeniami bezwarunkowymi, bezpośrednio zależnymi od czasu są zdarzenia:

- pojawienie się zgłoszenia w systemie („zgłoszenie zadania”),
- zakończenie zadania na stanowisku obsługi („zakończenie obsługi”).

W systemie tym występują także zdarzenia warunkowe „rozpoczęcie obsługi”, bowiem rozpoczęcie czynności obsługi zgłoszonego zadania jest możliwe, gdy przynajmniej jedno stanowisko obsługi jest wolne.



Rys. 4.3. Wielokanałowy system obsługi

Opis czynności związanych z wystąpieniem zdarzenia „zgłoszenie zadania” jest następujący:

- zaplanować następnego zgłoszenie zadania,
- rozpatrzyć procedurę zdarzenia warunkowego „rozpoczęcia obsługi” zgłoszonego zadania. Procedura ta polega na wykonaniu następującego badania: jeżeli istnieje wolne stanowisko obsługi należy rozpatrzyć algorytm czynności zdarzenia warunkowego zająć to stanowisko i zaplanować zakończenie obsługi na tym stanowisku, w przeciwnym przypadku zgłoszone zadanie należy wstawić do kolejki systemu.

Opis czynności związanych z wystąpieniem zdarzenia „zakończenie obsługi” na i -tym stanowisku jest następujący:

- jeżeli kolejka systemu nie jest pusta należy pobrać, zgodnie z przyjętym regulaminem kolejki, zadanie z kolejki i zaplanować zakończenie obsługi na i -tym stanowisku, w przeciwnym przypadku należy i -te stanowisko zwolnić.

Konstrukcja modelu symulacyjnego opisującego ten system przy zastosowaniu metody przeglądania działań, oparta jest na analizie warunków zajścia wszystkich zdarzeń systemu, bezwarunkowych i warunkowych. Algorytm symulacji funkcjonowania tego systemu obsługi jest następujący:

1. Ustal warunki początkowe.
2. Przesuń czas systemu do czasu wystąpienia pierwszego zdarzenia z listy zdarzeń.
3. Sprawdź czy spełniony jest warunek końca symulacji. Jeżeli warunek jest spełniony, to zakończ obliczenia symulacyjne, w przeciwnym przypadku przejdź do kroku 4.
4. Sprawdź warunek zajścia zdarzenia „zgłoszenie zadania”. Jeżeli warunek jest spełniony, to wykonaj czynności obsługi tego zdarzenia.
5. Sprawdź warunek zajścia zdarzenia „rozpoczęcie obsługi” na i -tym stanowisku. Jeżeli warunek jest spełniony, to wykonaj czynności obsługi tego zdarzenia.
6. Sprawdź warunek zajścia zdarzenia „zakończenie obsługi na i -tym stanowisku, Jeżeli warunek ten jest spełniony, to wykonaj czynności obsługi tego zdarzenia.
7. Przejdź do kroku 2.

4.3. Metoda planowania zdarzeń

Metoda planowania zdarzeń (ang. event oriented discrete simulation) polega na zastosowaniu w modelu obiektu o nazwie kalendarz zdarzeń. Jest to uporządkowany zbiór komunikatów zawierających informacje o chwilach wystąpienia poszczególnych zdarzeń bezwarunkowych, a także ich typach i potrzebnych parametrach [Tys90]. Oznacza to:

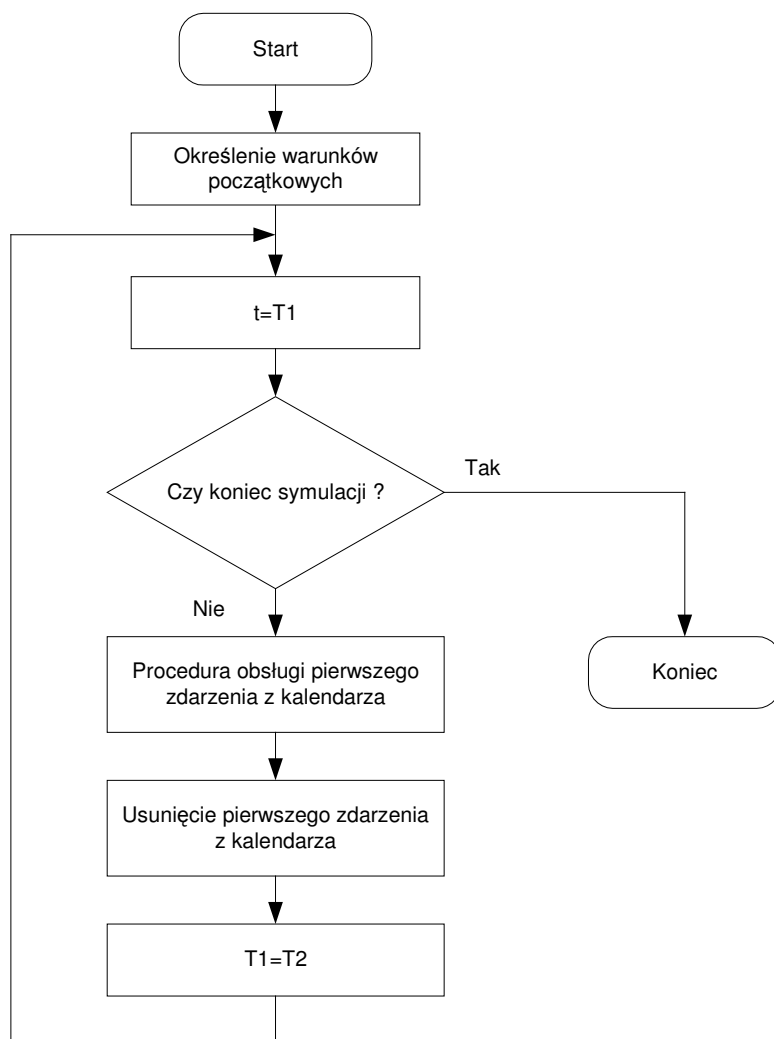
- wprowadzenie do kalendarza zdarzeń jedynie zdarzeń bezwarunkowych, bezpośrednio zależnych od czasu,
- planowanie kolejnych zdarzeń bezwarunkowych (typ, parametry, czas wystąpienia) odbywa się przy rozpatrywaniu czynności przypisanych do zdarzenia wcześniejszego,
- wprowadzenie czynności związanych z wystąpieniem zdarzeń warunkowych do czynności związanych z wystąpieniem zdarzeń bezwarunkowych,
- sterowanie przebiegiem symulacji w oparciu o kalendarz zdarzeń, który jest strukturą dynamiczną.

Wprowadzenie zdarzeń w systemie ma charakter planowania czasów, typów i parametrów zdarzeń bezwarunkowych, które będą zachodzić w systemie. Wystąpienie zdarzenia bezwarunkowego w symulacji zdarzeń dyskretnych wg metody planowania zdarzeń, pociąga za sobą wykonanie sekwencji czynności związanych z wystąpieniem tego zdarzenia, w tym dotyczących zdarzeń warunkowych.

Na przykład w chwili wystąpienia zdarzenia polegającego na zakończeniu obsługi klienta w stanowisku obsługi systemu kolejkowego należy wykonać następujące czynności: zwolnić stanowisko obsługi i przesunąć klienta do następnego punktu systemu, sprawdzić, czy przed stanowiskiem obsługi znajdują się następni klienci, przy czym jeśli istnieją klienci w kolejce, to należy zgodnie z regulaminem kolejkowym wybrać następnego klienta i umieścić go na stanowisku obsługi (zająć stanowisko obsługi).

Cechą charakterystyczną metody planowania zdarzeń jest istnienie w symulacji sposobu generowania następstwa zdarzeń bezwarunkowych oraz rozpatrywania tych samych zdarzeń warunkowych przy okazji różnych zdarzeń bezwarunkowych. Na przykład zdarzenie warunkowe „początek obsługi” klienta może być rozpatrywane przy okazji wystąpienia zdarzeń : „zgłoszenie” i „zakończenie obsługi”.

Algorytm przebiegu symulacji modelu zbudowanego w oparciu o metodę planowania zdarzeń jest następujący (rys. 4.4). Po ustaleniu warunków początkowych systemu należy przyjąć za czas systemowy t czas T_1 wystąpienia pierwszego zdarzenia zapisanego w kalendarzu. Następnie należy wykonać czynności związane z obsługą tego zdarzenia. Po wykonaniu tych czynności, wśród których występują czynności obsługi danego zdarzenia bezwarunkowego, obsługi zdarzeń warunkowych i czynności planowania następnych zdarzeń i wpisania ich do kalendarza, należy usunąć rozpatrzone zdarzenie bezwarunkowe z kalendarza i przesunąć czas systemu do czasu T_2 wystąpienia następnego zdarzenia. Przesunięcie czasu systemu odbywa się w dwóch fazach. W pierwszej, po usunięciu zdarzenia wykonanego, zdarzenie o indeksie 2 staje się zdarzeniem o indeksie 1. Czyli czas wystąpienia zdarzenia nr 2 staje się czasem wystąpienia zdarzenia nr 1. W drugiej fazie czas nowego zdarzenia nr 1 staje się czasem systemowym. Powyższe czynności ulegają powtórzeniu łącznie z badaniem warunku zakończenia obliczeń symulacyjnych.



Rys. 4.4. Algorytm przebiegu symulacji w metodzie planowania zdarzeń.

Dla przykładu rozpatrzmy przykład symulacji wielokanałowego, otwartego systemu obsługi, który został już opisany, przy omówieniu metody przeglądania działań.

Algorytm symulacji powyższego systemu obsługi jest następujący:

1. Ustal warunki początkowe.
2. Przesuń czas systemu do czasu wystąpienie pierwszego zdarzenia z listy kalendarza zdarzeń.
3. Sprawdź, czy spełniony jest warunek końca symulacji. Jeżeli warunek ten jest spełniony, to zakończ obliczenia symulacyjne, w przeciwnym przypadku przejdź do kroku 4.
4. Wykonaj czynności związane z obsługą pierwszego zdarzenia z listy kalendarza zdarzeń. Jeżeli zdarzeniem tym jest „zgłoszenie zadania”, to należy wykonać czynności przewidziane dla tego zdarzenia. Jeżeli zdarzeniem tym jest „zakończenie obsługi na i -tym stanowisku” należy wykonać czynności przewidziane dla zdarzenia „zakończenie obsługi na i -tym stanowisku”.
5. Usuń z kalendarza zdarzeń pierwsze zdarzenie, którego czynności aktualnie wykonano.
6. Przejdź do kroku 2.

5. MODEL SYMULACYJNY ROZPROSZONEGO SYSTEMU POMIAROWO – STERUJĄCEGO

5.1. Wprowadzenie

Przystępując do opracowania modelu symulacyjnego poczyniono następujące założenia:

- wszystkie parametry opisujące działanie modelu będą miały charakter deterministyczny,
- zostaną zastosowane następujące metody symulacji zdarzeń dyskretnych: metoda przeglądania działań oraz metoda planowania zdarzeń,
- model powinien charakteryzować się elastycznością struktury w sensie możliwości zastosowania różnych metod szeregowania zadań w poszczególnych blokach modelu,
- zostaną realizowane metody dostępu do magistrali komunikacyjnej: *master – slave*, *peer to peer*,
- w węzłach systemu będą realizowane następujące typy zadań: zadania lokalne, zadania pomiarowe, zadania wykonawcze, zadania bufora dedykowanego.

Zastosowanie dwóch metod w realizacji modelu symulacyjnego RSPS zostało podyktowane koniecznością rozpoznania specyfiki przedmiotu symulacji jakim jest RSPS. Do tego celu została wykorzystana metoda przeglądania działań. W realizacji modelu symulacyjnego wg tej metody rozbudowano elementy współpracy pomiędzy poszczególnymi blokami modelu, co z jednej strony umożliwiło większą kontrolę przebiegu procesu symulacji oraz zagwarantowało elastyczność modelu, ale z drugiej strony spowodowało wydłużenie czasu symulacji. W realizacji modelu wg metody planowania zdarzeń nie zastosowano rozbudowanych elementów współpracy pomiędzy poszczególnymi blokami, co umożliwiło skrócenie czasu symulacji. Do realizacji modelu symulacyjnego w oparciu o tę metodę pomocnym okazało się zebranie szeregu doświadczeń przy pracy nad modelem w oparciu o metodę przeglądania działań.

5.2. Model symulacyjny oparty o metodę przeglądania działań

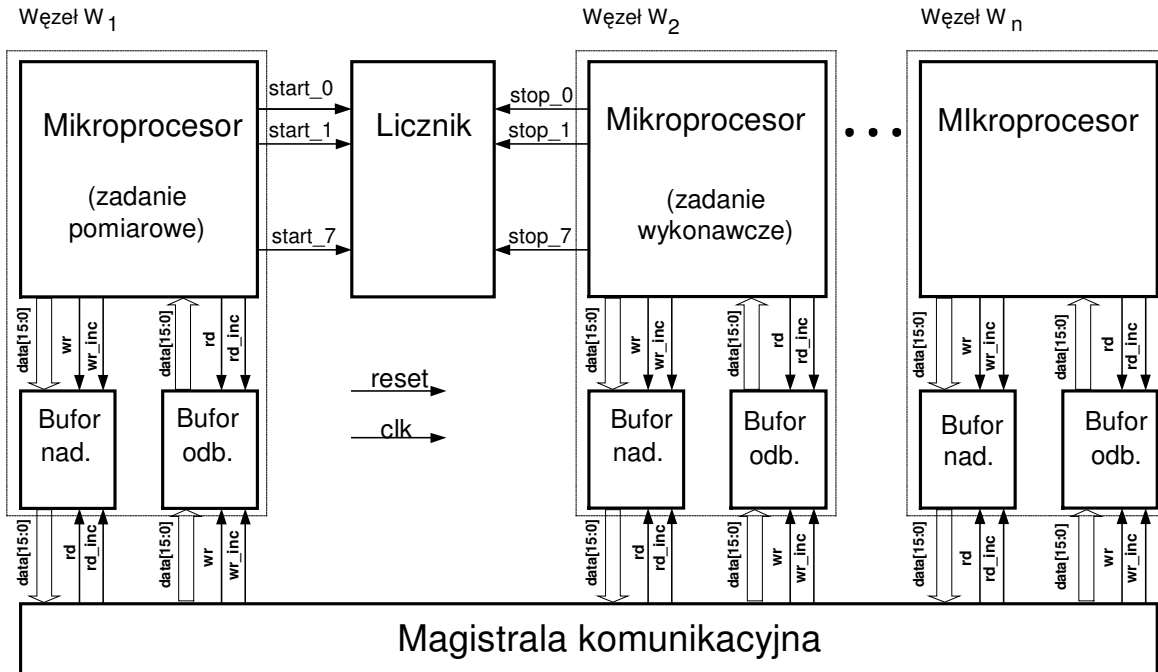
5.2.1. Model strukturalny

Podstawą do budowy modelu strukturalnego RSPS był przedstawiony w rozdziale 3 model komunikacyjny.

Model komunikacyjny został opracowany w sposób, który wyodrębnia z całej struktury systemu te elementy, w których występuje współużytkowanie. Są to mikroprocesory w węzłach systemu, bufory komunikacyjne nadawcze i odbiorcze węzłów oraz magistrala komunikacyjna. Podczas budowy modelu symulacyjnego powinna obowiązywać także taka zasada. Należy wydzielić te elementy systemu, które w różny sposób podlegają współużytkowaniu gwarantując zarazem ich bezkonfliktową współpracę [Mar03][Mar04].

W celu zapewnienia uniwersalności modelu w zakresie realizowania różnych struktur oraz różnych metod szeregowania zadań w poszczególnych blokach modelu, współpraca pomiędzy blokami modelu została zrealizowana podobnie jak to wygląda w rzeczywistych systemach mikroprocesorowych czyli za pośrednictwem odpowiednich sygnałów. Wyróżniono magistrale danych, sygnały sterujące oraz sygnały pomocnicze związane z obsługą odpowiednich liczników. Takie rozwiązanie daje także możliwość niezależnej pracy poszczególnych bloków modelu, a także ich niezależne testowanie w fazie uruchamiania.

Opracowany model strukturalny RSPS przedstawiono na rys. 5.1.



Rys. 5.1 Model strukturalny systemu

W węzłach modelu odbywa się szeregowanie przypisanych dla danego węzła zadań. Każdy z węzłów współpracuje, wykorzystując odpowiednie sygnały sterujące i magistralę danych, z przeznaczonym dla niego buforem nadawczym i odbiorczym. W buforach następuje przechowywanie danych odebranych lub do przesłania. Z buforami nadawczymi oraz odbiorczymi węzłów współpracuje blok magistrali, w którym realizowany jest mechanizm arbitrażu właściwy dla technologii *peer to peer* lub jest realizowany scenariusz wymian przewidziany dla technologii *master – slave*.

Zadanie realizowane w systemie tworzą dwa zadania umiejscowione w różnych węzłach, z których jedno jest określone jako zadanie pomiarowe i jest związane z pozyskaniem danych pomiarowych natomiast drugie jako zadanie wykonawcze i jest związane z wykorzystaniem tych danych. Z zadaniem pomiarowym i wykonawczym związane jest także wykonywane na magistrali systemu zadanie komunikacyjne.

5.2.2. Opis bloków modelu

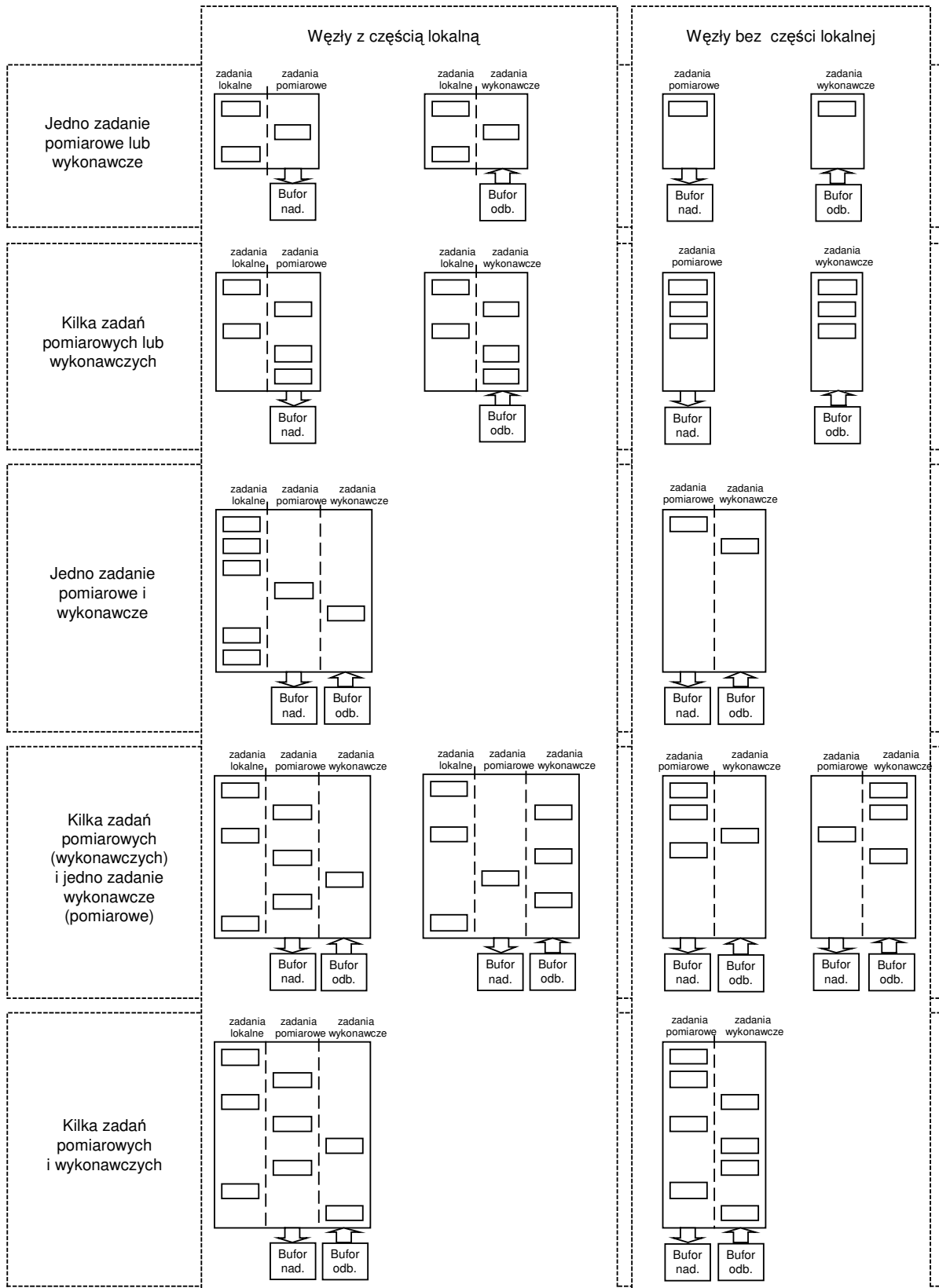
Węzły

W bloku węzła systemu realizowane jest założone szeregowanie zadań przewidzianych dla danego węzła. W modelu możliwe są do wykonania następujące typy zadań:

- zadania lokalne, które nie przetwarzają danych wpisywanych do bufora nadawczego węzła bądź odczytywanych z bufora odbiorczego węzła,
- zadania pomiarowe, które kończą się wpisaniem danych do bufora nadawczego węzła,
- zadania wykonawcze, które rozpoczynają się (lub kończą się) odczytem danych z bufora odbiorczego węzła.

W dowolnym węźle modelu możliwa jest równoczesna realizacja wszystkich typów zadań.

Na rys 5.2 przedstawiono klasyfikacje węzłów uwzględniającą typ realizowanych w węzle zadań.



Rys. 5.2. Klasyfikacja węzłów uwzględniająca typ realizowanych w węzłach zadań

Podstawowy podział rozróżnia węzły zawierające zadania lokalne lub nie zawierające takich zadań. W każdej z tych dwóch grup można wyróżnić węzły, które realizują dodatkowo pojedyncze (lub kilka) zadanie pomiarowe lub wykonawcze. W tych węzłach znajdzie zastosowanie jeden typ bufora komunikacyjnego: nadawczy lub odpowiednio odbiorczy.

W pozostałych realizacjach węzłów są w nich umieszczane zarówno zadania pomiarowe jak i wykonawcze począwszy od pojedynczych zadań, aż do kilku zadań każdego typu.

Liczba zadań realizowanych w określonych węzłach systemu ma wpływ na oczekiwanie na przydział czasu procesora, natomiast liczba zadań określonego typu, pomiarowe lub wykonawcze ma wpływ na współużytkowanie odpowiednio buforów nadawczych lub odbiorczych. Nadanie priorytetów zadaniom realizowanym przez węzeł określa ich kolejność w dostępie do czasu procesora.

Z punktu widzenia symulacji węzły można podzielić ze względu na :

- ilość zadań realizowanych przez węzeł (1 zadanie, kilka zadań),
- ilość zadań systemu realizowanych przez węzeł (od 1 do wszystkich),
- typ zadań realizowanych przez węzeł (pomiarowe, wykonawcze, lub mieszane),
- rodzaj szeregowania zadań wykonywanych przez węzeł.

W blokach buforów komunikacyjnych, nadawczych i odbiorczych, realizowane jest przechowywanie danych. W buforach nadawczych przechowywane są dane do przesłania przez blok magistrali komunikacyjnej. Dane są wpisywane do bufora w efekcie realizacji zadań pomiarowych. W buforach odbiorczych przechowywane są dane oczekujące na odczyt przez zadania wykonawcze po ich przesłaniu przez blok magistrali komunikacyjnej. Zarówno bufor nadawczy jak i odbiorczy pracują wg algorytmu FIFO (ang. first in first out).

Magistrala komunikacyjna

W zależności od realizowanych badań blok magistrali komunikacyjnej może realizować mechanizmy właściwe dla zasady dostępu *peer to peer* lub *master – slave*. W przypadku zasady dostępu *peer to peer* blok magistrali po sprawdzeniu stanu buforów nadawczych wszystkich węzłów, wykonuje przewidziany dla tej metody dostępu do nośnika arbitraż. Po odczycie wybranego bufora nadawczego węzła oraz inkrementacji wskaźnika odczytu tego bufora na podstawie liczby danych do przesłania, oraz założonej szybkości transmisji danych na magistrali zostaje wyznaczony czas, po którym blok magistrali dokonuje wpisania danych do bufora odbiorczego wybranego węzła dokonując także inkrementacji wskaźnika zapisu. Blok magistrali realizuje w takim przypadku funkcje filtru ACR (Acceptance Code Register) i AMR (Acceptance Mask Register) umiejscowione w procesorze komunikacyjnym tego rozwiązania.

W przypadku zasady dostępu *master – slave* wymiana danych pomiędzy dwoma węzłami wymaga aktywności węzła o statusie *master*. W węźle tym jest umieszczony scenariusz wymian danych, który opisuje jakie dane i w jakich odstępach czasu należy przesłać pomiędzy węzłami. Czas potrzebny do zrealizowania wymiany jest znacznie dłuższy niż w przypadku zasady dostępu *peer to peer*. Blok magistrali realizuje funkcje węzła *master*, funkcje buforów komunikacyjnych tego węzła, wyznacza opóźnienia związane z ramkami inicjującymi oraz zwrotnymi kierowanymi do węzła z zadaniem pomiarowym i wykonawczym. Blok magistrali realizuje także funkcje adresowania węzłów.

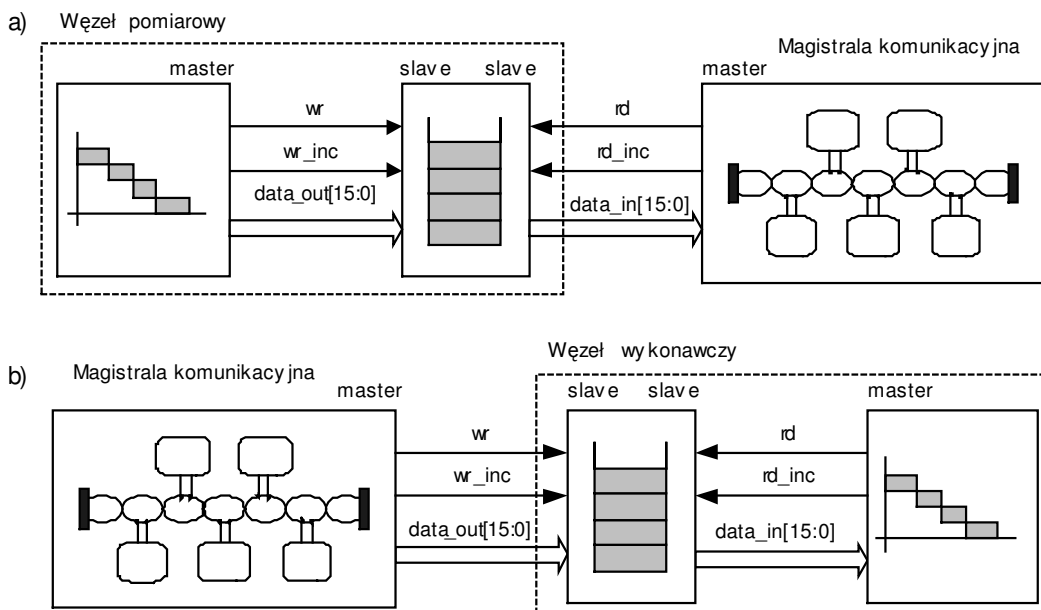
Liczniki

Model strukturalny został opracowany w taki sposób, aby między innymi umożliwić wyznaczanie opóźnień jakie powstają podczas przesyłania danych pomiarowych z węzła z zadaniem pomiarowym do węzła z zadaniem wykonawczym w przypadku zastosowania zasady dostępu do medium komunikacyjnego *master - slave* lub *peer to peer*. Zasada wyznaczania opóźnień jest następująca. Zadanie pomiarowe w chwili rozpoczęcia realizacji lub wpisu danych do bufora nadawczego węzła wystawia sygnał *startu* odpowiedniego licznika (rys. 5.1). Zadanie wykonawcze w chwili odczytu danych z bufora odbiorczego węzła lub wykorzystania odczytanych danych do sterowania wystawia sygnał *stop* tego samego licznika. Liczba zliczonych impulsów od momentu wystąpienia sygnału *start* do momentu wystąpienia sygnału *stop* jest wyznaczanym czasem opóźnienia. Wyniki kolejnych wyznaczonych opóźnień zapisywane są na plikach w celu dalszej analizy.

Wyznaczanie opóźnień zadań komunikacyjnych polega na przesyłaniu pomiędzy zadaniem pomiarowym i wykonawczym, należącym do pojedynczego zadania systemu, 16 bitów danych, z czego 8 starszych bitów określa priorytet danego zadania komunikacyjnego w kontekście dostępu do medium komunikacyjnego, natomiast 8 młodszych bitów zawiera wskaźnik kolejki kolejnej realizacji zadania pomiarowego. Na podstawie analizy tego wskaźnika po udanym odczycie z bufora odbiorczego węzła zadania wykonawczego określa się czy dane kolejnych realizacji zadania pomiarowego docierają do zadania wykonawczego.

Współpraca pomiędzy blokami modelu

Współpraca poszczególnych bloków odbywa się z użyciem odpowiednich sygnałów sterujących i magistral danych. Zasady współpracy poszczególnych bloków modelu przedstawiono na rys. 5.3. Na styku dwóch bloków funkcjonalnych (magistrala komunikacyjna – bufor komunikacyjny, procesor węzła – bufor komunikacyjny) należy określić, który z bloków będzie blokiem *master* (nadzoruje proces wymiany danych), a który będzie blokiem *slave*. W punkcie, gdzie styka się większa liczba bloków powinien pojawić się blok wykonujący arbitraż (metoda *peer to peer*) lub realizujący scenariusz wymian (metoda *master slave*).

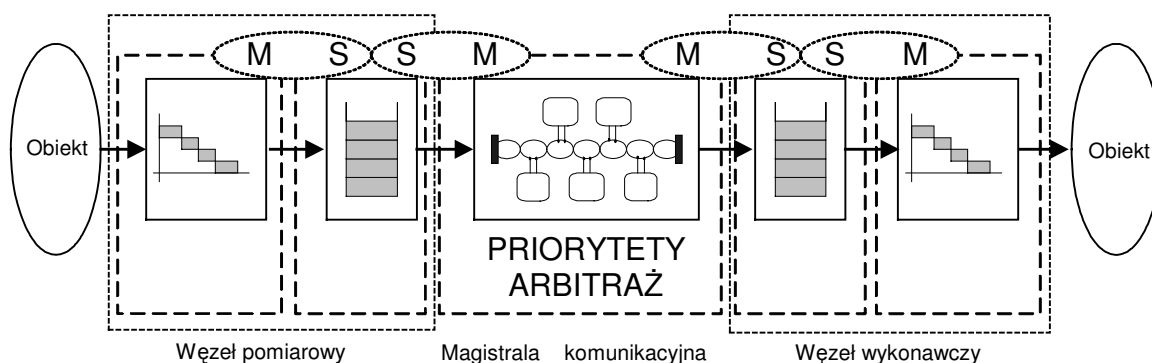


Rys. 5.3. Relacje między blokami w modelu strukturalnym: a) współpraca z buforem nadawczym, b) współpraca z buforem odbiorczym

Do komunikacji pomiędzy blokami wykorzystano sygnały zapisu (*wr*) i odczytu (*rd*), sygnały inkrementacji wskaźnika zapisu (*wr_inc*) i odczytu (*rd_inc*) oraz magistrale danych wejściowych (*data_in[0..15]*) i wyjściowych (*data_out[0..15]*).

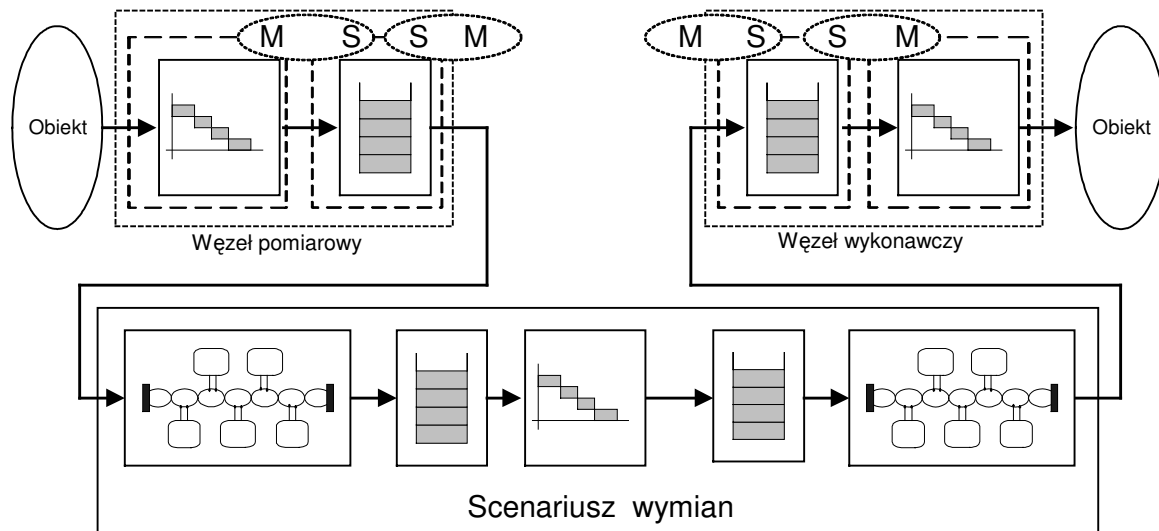
5.2.3. Model symulacyjny dla pojedynczego zadania

Realizowane w systemie zadania, które związane są z przetwarzaniem, przechowywaniem i przesyłaniem danych dotyczą wszystkich bloków modelu. Każdy z nich może w różny sposób wpływać na sumaryczne opóźnienie od momentu wykonania pomiaru określonej wielkości do momentu wykorzystania tych danych do sterowania [Mar04].



Rys. 5.4. Model symulacyjny dla pojedynczego zadania systemu z zasadą dostępu do magistrali *peer to peer*

Kolejne bloki modelu symulacyjnego, będące źródłami zmiennych opóźnień dla pojedynczego zadania w przypadku systemu z zasadą dostępu do magistrali *peer to peer* przedstawione są na rys. 5.4. Pierwszy współużytkowany element, przez który „przechodzą” dane, to mikroprocesor węzła pomiarowego, który może wykonywać kilka zadań czy też podprogramów i tylko jedno z nich jest związane z interesującym nas zadaniem systemu. Dane po odczytaniu np. z przetwornika A/C i przetworzeniu w mikroprocesorze umieszczane są w buforze nadawczym węzła pomiarowego, w którym mogą być równocześnie umieszczone dane przynależne do innych zadań systemu. 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 wykonawczego, którego jedno z zadań pobiera dane z bufora odbiorczego i na jej podstawie wykonuje odpowiednie sterowanie.



Rys. 5.5. Modelu symulacyjnego dla pojedynczego zadania systemu z zasadą dostępu do magistrali *master-slave*

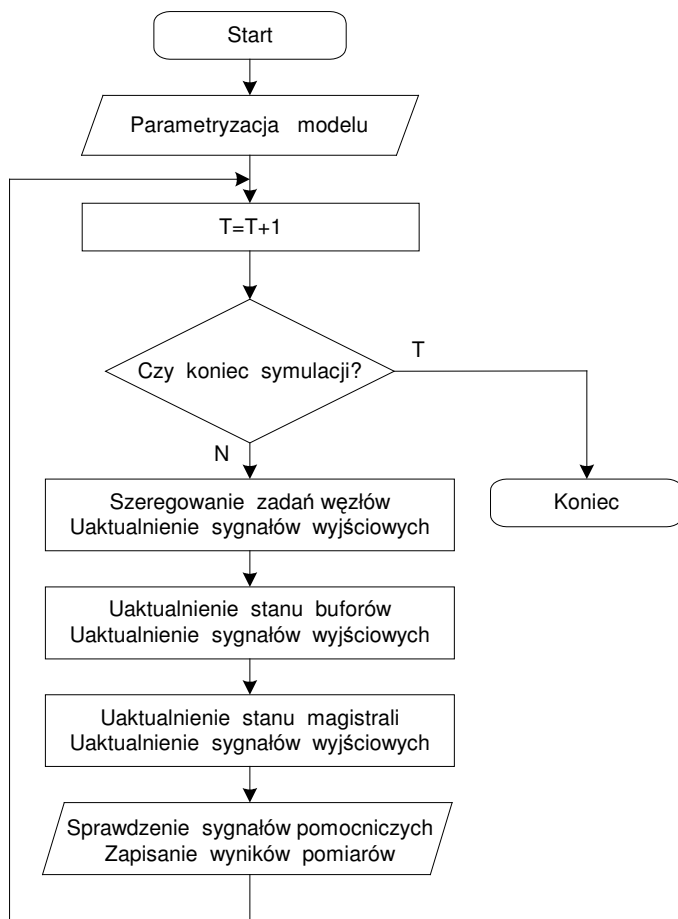
Podobnie jak w systemie z metodą dostępu do magistrali komunikacyjnej *peer to peer* w systemie z metodą *master-slave* występują blok węzła pomiarowego i wykonawczego z przynależnymi im buforami nadawczym i odbiorczym (rys. 5.5). Jednak w odróżnieniu od modelu systemu *peer to peer* blok magistrali realizuje scenariusz wymian wyznaczając opóźnienia związane z ramkami inicjującymi i zwrotnymi skierowanymi do węzła, w którym dane są pozyskiwane, i do węzła, w którym dane są wykorzystane do sterowania. W efekcie końcowym interesujące nas dane pomiarowe dwukrotnie przesyłane są przez magistralę komunikacyjną systemu.

5.2.4. Algorytm pracy programu realizującego model symulacyjny systemu metodą przeglądania działań

Algorytm pracy programu realizującego model symulacyjny systemu oparty o model strukturalny (rys. 5.1) przedstawiono na rys. 5.6. W każdym obiegu pętli głównej stan zegara systemu jest zwiększany o 1. Symulacja dotyczy równocześnie wszystkich węzłów, wszystkich buforów nadawczych i odbiorczych oraz magistrali. Liczba powtórzeń pętli głównej jest określana przez liczbę cykli zegara taktującego model.

Po wprowadzeniu w bloku „parametryzacja modelu” wartości początkowych dla wszystkich zmiennych wykorzystywanych podczas symulacji (liczba węzłów, parametry zadań węzłów i powiązań komunikacyjnych, ...) następuje inkrementacja zegara systemu i sprawdzenie warunku końca symulacji. W dalszej kolejności następuje wykonanie szeregowania zadań dla wszystkich węzłów wykorzystywanych podczas symulacji. W związku z tym, że część zadań może pobierać z buforów odbiorczych dane bądź wpisywać dane do buforów nadawczych węzłów, w trakcie szeregowania następuje także sprawdzenie ich stanu oraz nadanie odpowiednich wartości sygnałom wyjściowym węzłów. Po wykonaniu szeregowania węzłów, następuje sprawdzenie stanu sygnałów wejściowych we wszystkich buforach komunikacyjnych i w zależności od ich wartości następuje odpowiednia reakcja. Wyróżnia się wpis danych, inkrementację wskaźnika zapisu, odczyt danych oraz inkrementację wskaźnika odczytu. Po uaktualnieniu stanu buforów komunikacyjnych następuje uaktualnienie stanu magistrali. Działanie magistrali w zależności od metody dostępu do nośnika polega na realizacji wymian danych pomiędzy węzłami, co sprowadza się do odczytania wyznaczonych na podstawie arbitrażu (dla metody dostępu *peer to peer*) lub na

podstawie scenariusza wymian (dla metody dostępu *master – slave*) wybranych buforów nadawczych węzłów i po odmierzeniu wyznaczonego opóźnienia wpisaniu tych danych do bufora odbiorczego określonego węzła. Zarówno odczytanie danych z bufora nadawczego, jak i zapisanie danych do bufora odbiorczego węzła jest związane z nadaniem określonej wartości sygnałom wyjściowym bloku magistrali.

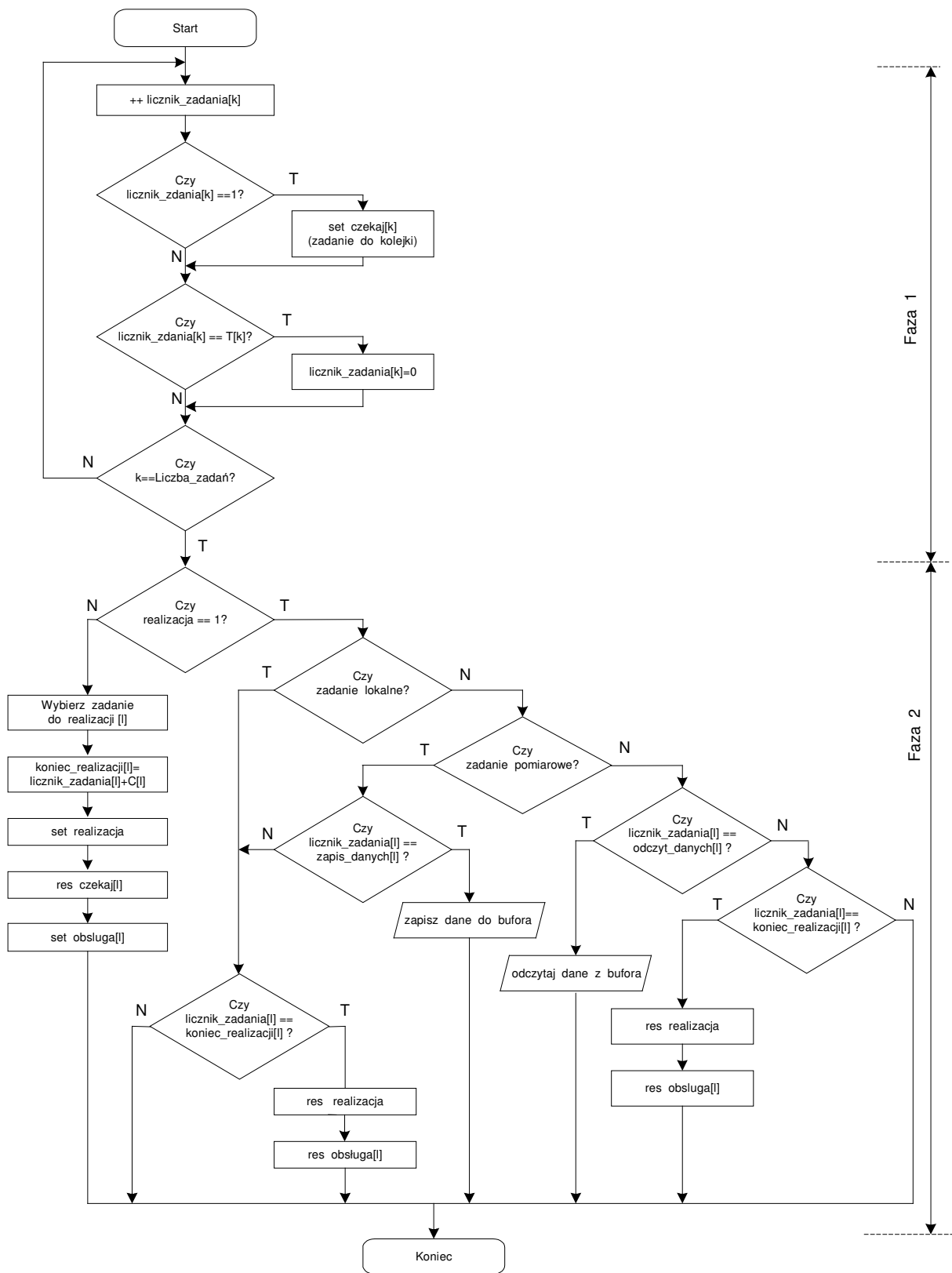


5.6. Algorytm pracy programu realizującego model symulacyjny

5.2.5. Algorytm pracy programu realizującego szeregowanie zadań węzła

Algorytm pracy programu realizującego szeregowanie zadań węzła przedstawiono na rys. 5.7. Realizacja programu składa się dwóch faz. W pierwszej fazie następuje sprawdzenie warunku zgłoszenia zadania. Odbywa się to na podstawie sprawdzenia stanu dedykowanego dla każdego zadania licznika. Każde zgłoszone zadanie otrzymuje status „czekaj”, czyli jest umieszczane w kolejce zadań czekających na przydzielenie czasu procesora. W tej fazie realizacji programu następuje także wyzerowanie licznika zadania w przypadku osiągnięcia wartości równej parametrowi T zadania.

W drugiej fazie następuje sprawdzenie warunku rozpoczęcia realizacji zadania, pobranie zadania z kolejki i przydzielenie czasu procesora na czas ustalony parametrem C zadania. Ponadto w trakcie zajętości procesora dla określonych typów zadań następuje sprawdzenie warunków wykonania zapisu danych do bufora nadawczego bądź odczytu danych z bufora odbiorczego. Realizowane zadanie otrzymuje status „obsługa”. O tym czy w danym uruchomieniu programu ma nastąpić pobranie zadania z kolejki czy też jego realizacja i zakończenie decyduje wskaźnik „realizacja” związany z danym węzłem.



Rys. 5.7. Algorytm pracy programu realizującego szeregowanie zadań węzła modelu

Na rys. 5.7, ze względu na zachowanie odpowiedniego poziomu czytelności, obsługę magistral danych, sygnałów sterujących oraz sygnałów pomocniczych ujęto w blokach

realizowanych przy wystąpieniu określonych warunków. Użycie poszczególnych sygnałów odbywa się w fazach. Wszystkie sygnały sterujące jak i pomocnicze wystawiane są zawsze na jeden cykl zegara systemu. Uwzględnienie tego w algorytmie spowodowałoby jego znaczną rozbudowę.

Przy takim algorytmie możliwe jest zrealizowanie szeregowania wg metody RM i DM. Wymaga to na etapie inicjalizacji systemu uporządkowania zadań wg kolejności narzuconej przez wartość parametru T (okres występowania zadań) lub D (ograniczenie czasowe zadań).

Zakłada się także, że wszystkie zgłoszenia zadań zostaną zrealizowane, to znaczy otrzymają czas procesora wg wartości parametru C (czas realizacji zadania).

5.2.6. Parametryzacja modelu systemu

Przed przeprowadzeniem symulacji należy określić następujące grupy parametrów:

1. Parametry dotyczące węzłów:

- liczba węzłów w modelu,
- liczba zadań realizowanych w poszczególnych węzłach i parametry zadań: czas realizacji – C , okres występowania – T , i ograniczenie czasowe - D ,
- typ każdego zadania (lokalne, pomiarowe, wykonawcze),
- rodzaj użytego szeregowania zadań: RM, DM.
- dyscyplina bufora komunikacyjnego: FIFO,
- długość bufora komunikacyjnego:8,
- reakcja w chwili przepełnienia bufora: nadpisywanie ostatniej lokacji.

2. Parametry dotyczące magistrali komunikacyjnej

- szybkość transmisji danych na magistrali komunikacyjnej,
- czas przesyłania ramek komunikacyjnych uwzględniający ich budowę, długość, liczbę przesyłanych w ramce danych oraz prędkość magistrali,
- realizowana metoda dostępu do magistrali (priorytety i arbitraż, scenariusz wymian).
- liczba zadań komunikacyjnych,
- które z zadań węzłów utworzą pary zadań komunikacyjnych (powiązania),
- liczba danych przesyłana w każdym zadaniu komunikacyjnym,
- strategia przydzielania priorytetów dla poszczególnych zadań.

Należy również określić czas, w którym będą przeprowadzane symulacje.

Parametry C , D i T zadań w węzłach, szybkość transmisji danych na magistrali, czas przesyłania wykorzystywanych ramek komunikacyjnych oraz czas symulacji są wyrażone w liczbie cykli zegara taktującego model.

5.2.7. Parametry wynikowe symulacji

Podczas przeprowadzania symulacji zbierane są dane dotyczące zachowania się systemu. Biorąc pod uwagę sposób ich prezentacji i obliczenia dane te podzielono na dwie grupy:

- dane przedstawiane w postaci liczbowej,
- dane przedstawiane w postaci histogramów.

Parametry liczbowe

Dla każdego zadania systemu są rejestrowane następujące parametry:

- L_{TP} - liczba realizacji zadania pomiarowego,
- L_{NP} - liczba nadpisań po stronie pomiarowej (z liczników do pomiaru opóźnień),
- L_{TW} - liczba realizacji zadania wykonawczego,
- L_{POBO} - liczba poprawnych odczytów bufora odbiorczego,
- L_{NBN} - liczba nadpisań w buforze nadawczym,
- L_{NBO} - liczba nadpisań w buforze odbiorczym,
- L_{OBN} - liczba odczytów bufora nadawczego (*master – slave*),
- L_{POBN} - liczba poprawnych odczytów bufora nadawczego (*master – slave*).

Z parametrów tych wyznaczane są następujące współczynniki:

- k_p - współczynnik przejścia dla zadania systemu wyznaczany jako:

$$k_p = \frac{L_{TP} - L_{NBN} - L_{NBO}}{L_{TP}} = 1 - \left(\frac{L_{NBN} + L_{NBO}}{L_{TP}} \right), \quad (5.1)$$

lub

$$k_p = \frac{L_{POBO}}{L_{TP}}, \quad (5.2)$$

- k_s – współczynnik przejścia systemu wyznaczany jako:

$$k_s = \frac{\sum_{i=1}^{i=L_z} k_{pi}}{L_z}, \quad (5.3)$$

gdzie:

k_{pi} - współczynnik przejścia zadania systemu,

L_z - liczba zadań realizowanych w systemie,

- nadmiarowość zadania pomiarowego wyznaczaną jako:

$$N_p = \frac{L_{NBN} + L_{NBO}}{L_{TP}}, \quad (5.4)$$

- nadmiarowość magistrali po stronie pomiarowej wyznaczaną jako (*master – slave*):

$$N_{MP} = \frac{L_{OBN} - L_{POBN}}{L_{OBN}}, \quad (5.5)$$

- nadmiarowość magistrali po stronie wykonawczej wyznaczaną jako:

$$N_{MW} = \frac{L_{NBO}}{L_{POBN}}, \quad (5.6)$$

- nadmiarowość zadania wykonawczego wyznaczaną jako:

$$N_w = \frac{L_{TW} - L_{POBO}}{L_{TW}}. \quad (5.7)$$

Parametry są tak określone, aby przy poprawnie działającym systemie współczynnik przejścia był równy 1, a pozostałe parametry miały wartość 0.

Tak zdefiniowane przez autora współczynniki umożliwiają lepsze określenie właściwości RSPS.

Współczynnik przejścia dla zadania systemu określa stopień utraty danych w systemie w efekcie nadpisań w buforach komunikacyjnych nadawczym i odbiorczym. Współczynnik przejścia systemu, określany jako wartość średnia współczynników przejścia wszystkich zadań systemu, umożliwia sprawdzenie czy system wykona wszystkie zadania nie gubiąc żadnego z nich, co może być podstawą dalszych prac nad projektowanym systemem.

Wymienione w tabeli 5.1 cztery rodzaje nadmiarowości pozwalają na określenie, które elementy systemu wykonują zbędne cykle, ewentualnie są zbyt szybkie lub zbyt wolne w stosunku do współpracujących z nimi elementami systemu. W tabeli 5.1 przedstawiono mechanizmy powstawania nadpisań w przypadku współużytkowania buforów komunikacyjnych do przechowywania danych należących do kilku zadań komunikacyjnych lub w przypadku wykorzystywania danego bufora tylko dla jednego zadania komunikacyjnego.

Tabela 5.1 Nadmiarowości w systemie *perr to peer* oraz *master - slave*

Typ nadmiarowości	Mechanizm powstawania	Pojedyncze zadanie pomiarowe lub wykonawcze	Kilka zadań pomiarowych lub wykonawczych	Uwagi
Nadmiarowość zadania pomiarowego N_p	Nadpisywanie w przepełnionym buforze nadawczym węzła danych zadania pomiarowego bez inkrementacji wskaźnika zapisu	Nadpisywanie swoich danych	Nadpisywanie swoich danych oraz danych innych zadań	Za mała szybkość transmisji danych na magistrali
Nadmiarowość magistrali po stronie pomiarowej N_{MP}	Zbędne odczyty z bufora nadawczego węzła – brak nowych danych			Za duża szybkość transmisji danych na magistrali (tylko dla <i>master - slave</i>)
Nadmiarowość magistrali po stronie wykonawczej N_{MW}	Nadpisywanie w buforze odbiorczym węzła danych zadania wykonawczego bez inkrementacji wskaźnika zapisu	Nadpisywanie swoich danych	Nadpisywanie swoich danych oraz danych innych zadań	Za duży okres występowania zadań wykonawczych
Nadmiarowość zadania wykonawczego N_w	Zbędne odczyty z pustego bufora odbiorczego lub odczyt nie swoich danych bez inkrementacji wskaźnika			Za mała szybkość transmisji danych na magistrali, za duży okres występowania zadań wykonawczych

Parametry charakteryzowane rozkładami

Druga grupa parametrów uzyskiwanych podczas symulacji jest związana z wyznaczaniem różnego rodzaju opóźnień (rys. 5.8).

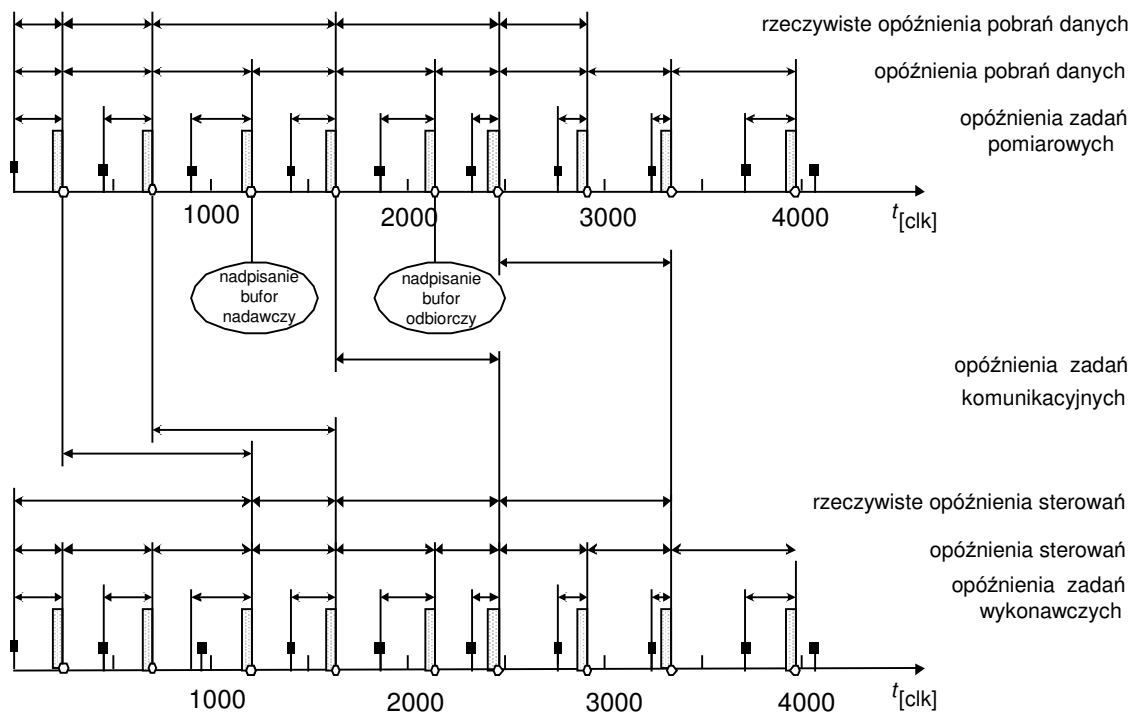
W modelu symulacyjnym wyznaczany jest czas reakcji dla wszystkich zadań realizowanych w węzłach niezależnie od tego czy są to zadania lokalne, pomiarowe czy też wykonawcze.

Kolejne opóźnień dotyczą zadań systemu. Dla zadania pomiarowego będącego częścią zadania systemu są wyznaczane opóźnienia pomiędzy końcami kolejnych realizacji tych zadań. Kolejne opóźnienie jakie jest brane pod uwagę to opóźnienie pomiędzy kolejnymi końcami udanych realizacji zadań pomiarowych, to znaczy takich, których dane wpisywane do bufora nadawczego nie giną w systemie i są odczytywane przez zadanie wykonawcze.

Analogiczne opóźnienia są wyznaczane dla zadania wykonawczego będącego częścią zadania systemu. Są wyznaczane opóźnienia pomiędzy kolejnymi końcami realizacji zadań wykonawczych oraz są wyznaczane opóźnienia pomiędzy kolejnymi końcami udanych realizacji zadań wykonawczych, to znaczy takich, które dokonują odczytu danych z bufora odbiorczego węzła.

Ostatnie wyznaczane opóźnienie to opóźnienie od momentu wpisania danych przez zadanie pomiarowe określonego zadania systemu do bufora nadawczego, do chwili odczytu tych danych przez zadanie wykonawcze tego samego zadania systemu z bufora odbiorczego węzła. Opóźnienie to nazwane jest opóźnieniem zadania komunikacyjnego.

W sumie dla każdego zadania systemu podczas pojedynczej realizacji jest wyznaczanych siedem różnych opóźnień.



Rys. 5.8. Wyznaczanie opóźnień podczas symulacji dla pojedynczego zadania systemu

Wartości kolejnych wyznaczonych opóźnień są umieszczane w plikach i umożliwiają w ten sposób wyznaczenie następujących histogramów:

- histogram opóźnień zadań węzłów (część pomiarowa, część wykonawcza),
- histogram opóźnień zadań komunikacyjnych systemu,
- histogram pobrań danych zadania systemu,
- rzeczywisty histogram pobrań danych zadania systemu,
- rzeczywisty histogram sterowań zadania systemu,
- histogram sterowań zadania systemu.

Na podstawie otrzymanych rozkładów można wyznaczyć wartości liczbowe takie jak np.: wartość średnia, minimalna, maksymalna,

Histogram opóźnień zadań węzłów jest to histogram kolejnych zarejestrowanych podczas symulacji czasów opóźnień od chwili wyzwolenia zadania do momentu zakończenia jego realizacji. Jest on rejestrowany dla każdego zadania (lokalne, pomiarowe, wykonawcze) we wszystkich węzłach uczestniczących w przeprowadzanej symulacji.

Suma czasów opóźnienia zadania pomiarowego i opóźnienia zadania komunikacyjnego przy założeniu, że odczyt danych z bufora odbiorczego węzła występuje na końcu realizacji zadania wykonawczego, to czas reakcji zadania systemu. Opóźnienia zadania pomiarowego i zadania komunikacyjnego muszą dotyczyć pojedynczej realizacji zadania systemu.

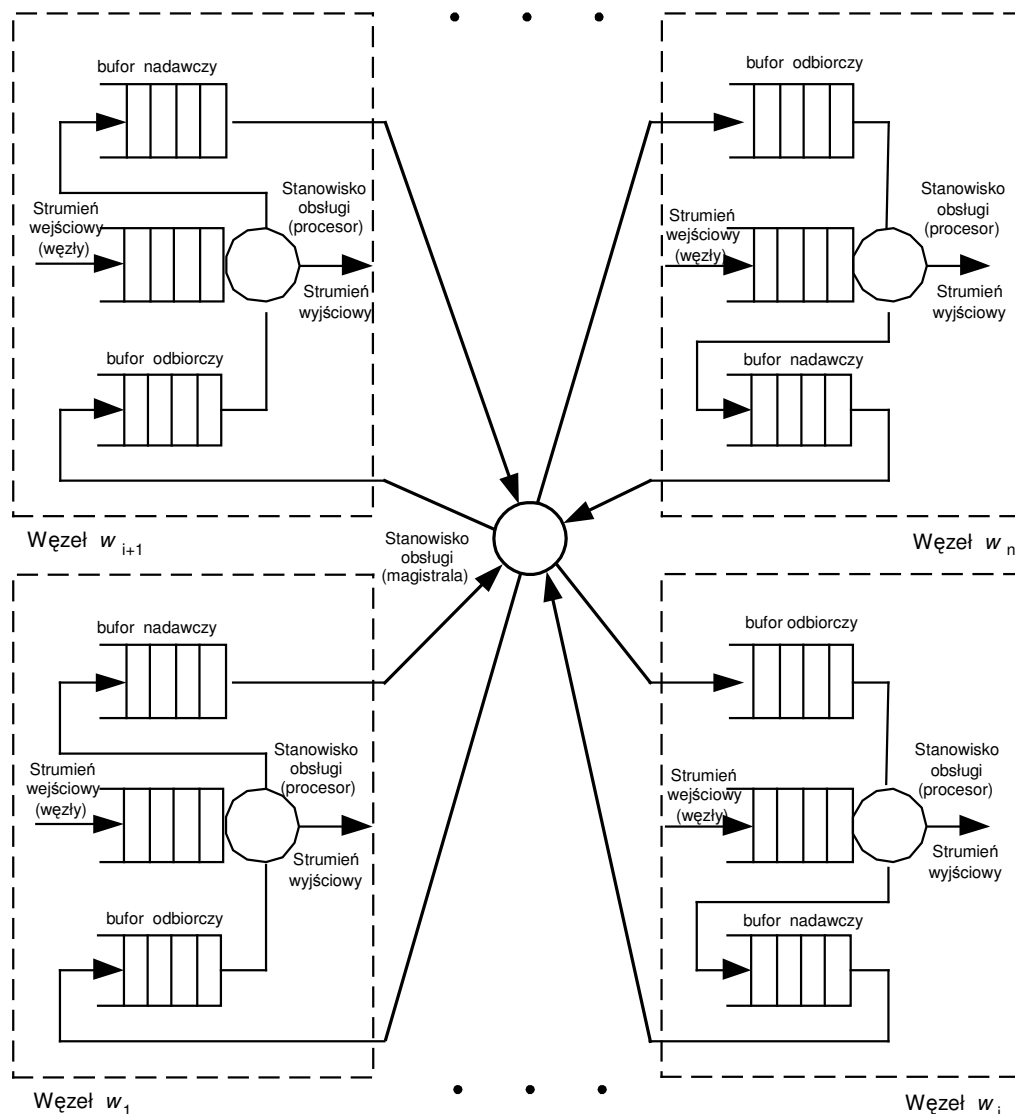
Kolejne rejestracje odstępów czasu pomiędzy końcami realizacji zadania pomiarowego należącego do danego zadania systemu składają się na histogram pobrań danych zadania systemu. Jednak część danych w systemie jest tracona w efekcie nadpisań w buforach komunikacyjnych nadawczych i odbiorczych. Można w takim przypadku mówić o rzeczywistym histogramie pobrań danych, który odrzuca te aktywacje zadania pomiarowego, którego dane są tracone w systemie.

Analogicznie rejestrowany jest histogram sterowań po stronie wykonawczej zadania systemu. Kolejne odstępy pomiędzy kolejnymi końcami realizacji zadania wykonawczego utworzą histogram sterowań, a po odrzuceniu tych aktywacji zadania wykonawczego, które nie odczytują danych z bufora odbiorczego, otrzymujemy rzeczywisty histogram sterowań.

5.3. Model symulacyjny oparty o metodę planowania zdarzeń

5.3.1. Model strukturalny

W modelu symulacyjnym opartym o metodę przeglądania działań zgodnie z ideą tej metody określono szereg warunków, które wyznaczają moment rozpoczęcia lub zakończenia każdego z działań w systemie. W modelu symulacyjnym opartym o metodę planowania zdarzeń moment rozpoczęcia lub zakończenia określonego działania jest planowany, a czasy planowanych zdarzeń są zapisywane i porządkowane w kalendarzu zdarzeń. Jest to podstawowa różnica pomiędzy tymi dwoma realizacjami. Pozostałe różnice polegają na tym, że w modelu planowania zdarzeń nie wyodrębniono bloków realizujących określone funkcje systemu i w konsekwencji zrezygnowano z stosowania magistral danych, sygnałów sterujących i pomocniczych. W zamian określono jednoznacznie następstwa określonych zdarzeń. W ten sposób struktura modelu symulacyjnego staje się mało elastyczna i niepodatna na analizy, lecz model symulacyjny umożliwia przeprowadzanie badań symulacyjnych w krótszym czasie.



Rys 5.9. Model kolejkowy RSPS

W metodzie planowania zdarzeń rozproszony system pomiarowo – sterujący jest traktowany jako sieć stanowisk obsługi występujących we wszystkich węzłach. Stanowiskiem obsługi jest także magistrala komunikacyjna systemu.

Strukturę modelu uwzględniającą wymienione stanowiska obsługi przedstawiono na rys. 5.9.

Zgodnie z nazewnictwem stosowanym w teorii kolejek, węzły systemu są prostymi jednokanałowymi i jednokolejkowymi stanowiskami obsługi, natomiast magistrala komunikacyjna systemu jest wielokolejkowym jednokanałowym stanowiskiem obsługi. Przedstawiona przez autora realizacja bloku magistrali w sposób jak najbliższy realizacji fizycznej, jest rozwiązaniem oryginalnym.

W stosunku do modelu pracującego wg zasady przeglądania działań zmieniono także zasadę wyznaczania opóźnień. Wyznaczanie opóźnienia polega na obliczeniu różnicy pomiędzy zarejestrowanymi stanami zegara modelu w momencie zakończenia określonej realizacji i stanem zarejestrowanym w momencie rozpoczęcia określonej realizacji.

Wyznaczanie opóźnień zadań komunikacyjnych, tak jak w przypadku systemu z przeglądaniem działań, polega na przesyłaniu pomiędzy zadaniem pomiarowym i wykonawczym, należącym do pojedynczego zadania systemu, 16 bitów danych, z czego 8 starszych bitów określa priorytet danego zadania komunikacyjnego w kontekście dostępu do medium komunikacyjnego, natomiast 8 młodszych bitów zawiera wskaźnik kolejki kolejnej realizacji zadania pomiarowego. Na podstawie analizy tego wskaźnika, po udanym odczycie z bufora odbiorczego węzła zadania wykonawczego, określa się czy dane kolejnych realizacji zadania pomiarowego docierają do zadania wykonawczego.

5.3.2. Algorytm pracy programu realizującego model symulacyjny systemu metodą planowania zdarzeń

W programie realizującym model symulacyjny wyróżniono następujące rodzaje zdarzeń bezwarunkowych i warunkowych:

- zdarzenia bezwarunkowe:

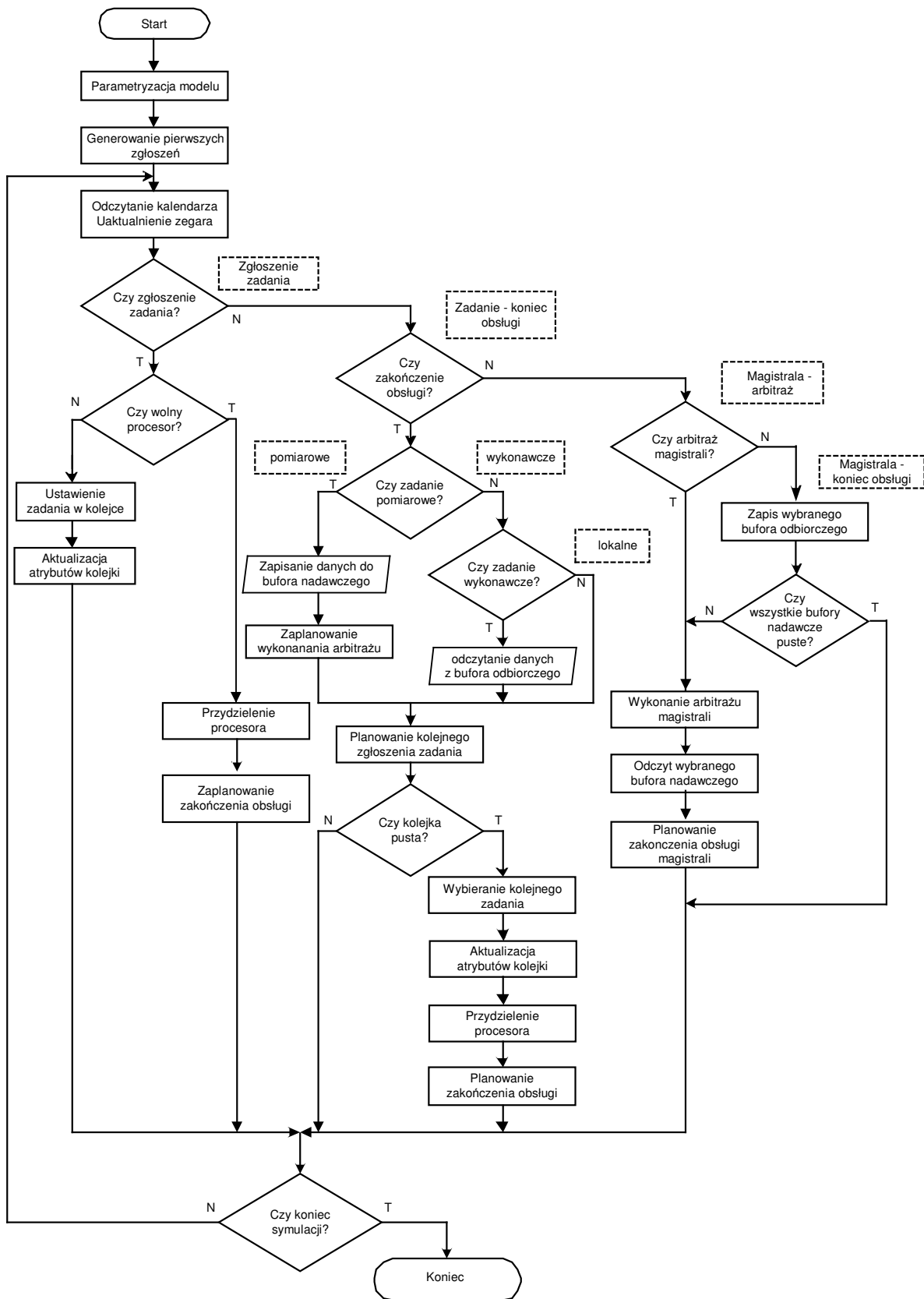
- zgłoszenie zadania węzła,
- zakończenie obsługi zadania węzła,
- zakończenie obsługi zadania magistrali,

- zdarzenia warunkowe:

- rozpoczęcie obsługi zadania węzła,
- rozpoczęcie obsługi zadania magistrali - arbitraż magistrali.

Podstawowy element modelu to dynamiczny kalendarz, który jest wspólny dla stanowisk obsługi realizowanych we wszystkich węzłach oraz stanowiska obsługi realizującego funkcje magistrali komunikacyjnej.

Podobnie jak w modelu zbudowanym wg metody przeglądania działań symulacja i w tym przypadku dotyczy równocześnie wszystkich węzłów, wszystkich buforów nadawczych i odbiorczych oraz magistrali komunikacyjnej. Algorytm pracy programu realizującego model systemu przedstawiono na rys 5.10. Ze względu na zachowanie odpowiedniego poziomu czytelności rysunku algorytm uwzględnia tylko planowanie zdarzeń dla jednego węzła systemu.



Rys. 5.10. Algorytm programu realizującego model sytemu wg metody planowania zdarzeń

Po wprowadzeniu w bloku parametryzacja modelu wartości początkowych dla wszystkich zmiennych wykorzystywanych podczas symulacji (określonych w rozdz. 5.2.6) następuje wygenerowanie pierwszych zgłoszeń zadań realizowanych w węźle i wpisanie informacji o tych zdarzeniach do kalendarza zdarzeń.

Podczas realizacji pojedynczej pętli głównej programu następuje odczyt kolejnego zdarzenia z kalendarza zdarzeń. Po odczycie zdarzenia następuje zgodnie z zawartością kalendarza aktualizacja zegara modelu. Po każdym odczycie kalendarza następuje przesunięcie jego zawartości, tak aby wskaźnik odczytu zawsze wskazywał lokację o indeksie 0. Znacznie ułatwia to przeprowadzenie sortowania zawartości kalendarza po dokonaniu nowego wpisu. Atrybutem zdarzenia, który decyduje o uporządkowaniu zawartości kalendarza jest oczywiście atrybut przechowujący stan zegara modelu, przy którym ma wystąpić określone zdarzenie.

Po odczycie zdarzenia z kalendarza zdarzeń następuje wykonanie przewidzianych dla danego zdarzenia czynności. Kolejne bezwarunkowe zdarzenia umieszczane w kalendarzu są związane z wykonaniem następujących czynności:

- Zgłoszenie zadania węzła. Następuje sprawdzenie czy można rozpocząć obsługę zadania? Jeżeli tak to następuje zaplanowanie zakończenia obsługi zadania węzła, wpisanie tego zdarzenia do kalendarza i dokonanie jego sortowania. Jeżeli procesor węzła jest zajęty zadanie umieszczane jest w kolejce i nadawany jest zadaniu status „czekaj”.
- Zakończenie obsługi zadania węzła. W zależności od typu kończonego zadania (lokalne pomiarowe, wykonawcze) wykonywany jest przewidywany zapis danych do buforów nadawczych, bądź odczyt danych z buforów odbiorczych. Ponadto jeżeli kończone zadanie jest zadaniem pomiarowe, to planowane jest wykonanie arbitrażu magistrali, wpisanie tego zdarzenia do kalendarza i wykonanie jego sortowania. Następnie planowane jest kolejne zgłoszenie obsługiwanego zadania, wpisanie tego zdarzenia do kalendarza i wykonanie jego sortowania. Dodatkowo następuje sprawdzenie czy są kolejne zadania do obsługi z tego węzła. Jeżeli są kolejne zadania do obsługi w danym węźle jest wybierane jedno z nich, planowane jest jego zakończenie obsługi, wpisanie tego zdarzenia do kalendarza i wykonywane jest jego sortowanie. Wykonie arbitrażu na magistrali komunikacyjnej jest zadaniem warunkowym związanym z zdarzeniem bezwarunkowym „zakończenia obsługi zadania” dla zadania pomiarowego. Jednak może się zdarzyć, że dla identycznego stanu zegara systemu w innych węzłach systemu także wystąpi uzupełnienie bufora nadawczego węzła. Dlatego, aby uniknąć przedwczesnego wykonania arbitrażu magistrali zdarzenie to jest wpisywane do kalendarza zdarzeń, ze stanem zegara identycznym jak w chwili zakończenia zadania, ale na ostatniej lokacji z grupy zadań o identycznym stanie zegara.
- Zakończenie obsługi zadania magistrali. Następuje wpisanie przesyłanych przez magistrale danych do odpowiedniego bufora odbiorczego. Następnie dokonywane jest sprawdzenie czy są jeszcze dane do przesłania, jeżeli tak to jest wykonywane zdarzenie warunkowe arbitraż magistrali. Następnie jest planowane zakończenie obsługi zadania magistrali, wpisanie tego zdarzenia do kalendarza i wykonanie jego sortowania.
- Rozpoczęcie obsługi zadania magistrali – arbitraż magistrali. Następuje sprawdzenie zawartości buforów nadawczych wszystkich węzłów, następnie wybranie bufora z

danymi o najwyższym priorytecie, dokonanie odczytu danych z tego bufora. Następnie jest planowane zakończenie obsługi zadania magistrali, wpisanie tego zdarzenia do kalendarza i wykonywane jest jego sortowanie.

Pojedyncza realizacja pętli głównej programu kończy się sprawdzeniem warunku zakończenia symulacji.

Każdy wpis do kalendarza zdarzeń jest związany z jego sortowaniem. Kryterium sortowania jest wartość atrybutu zegar, który określa dla jakiej wartości zegara systemu obsługa danego zdarzenia ma być przeprowadzona.

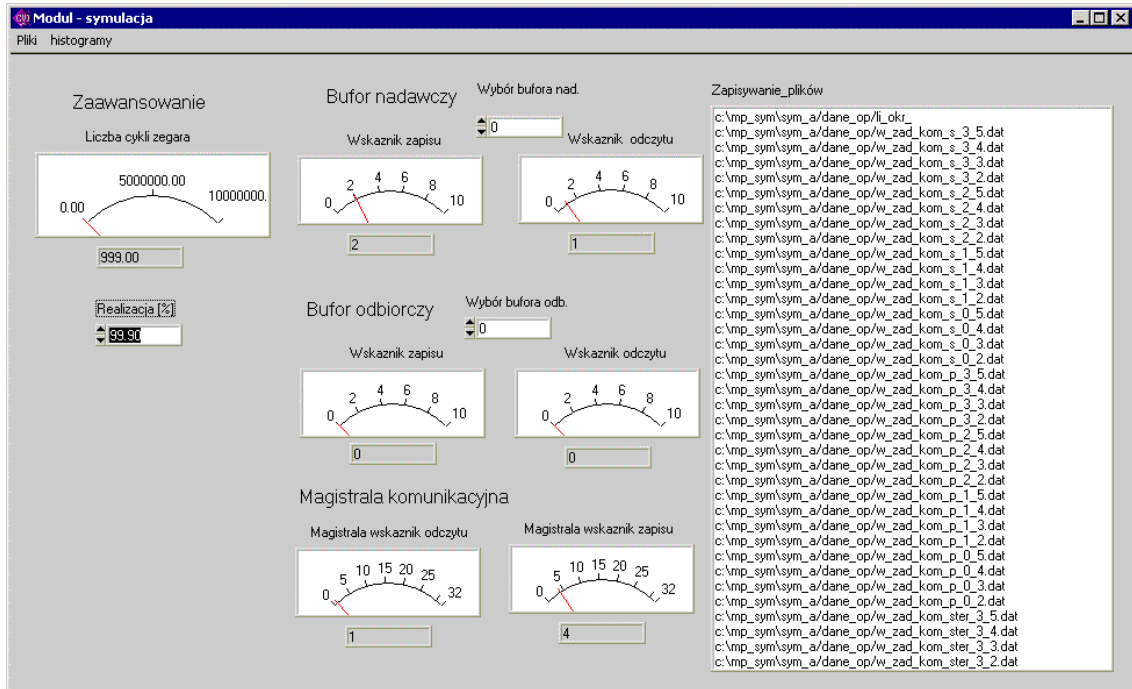
Wypełnianie buforów nadawczych, które podlegają arbitrażowi występuje w chwili realizacji zdarzeń „zakończenia obsługi zadania węzła”, których typ jest określony jako zadanie pomiarowe. Odczytanie kolejnych lokacji buforów nadawczych następuje po wykonaniu „arbitrażu magistrali”. Wypełnianie buforów odbiorczych następuje w chwili realizacji zdarzenia „zakończeniu obsługi zadania magistrali”, natomiast ich odczytywanie jest wykonywane przez zdarzenia „zakończenia obsługi zadania węzła”, których typ jest określony jako zadanie wykonawcze.

Na rys. 5.10, ze względu na zachowanie odpowiedniego poziomu czytelności, elementy związane z aktualizacją liczników (realizacji i nadpisań) oraz elementy związane z wyznaczaniem opóźnień ujęto w blokach realizujących określone zdarzenia bezwarunkowe i warunkowe.

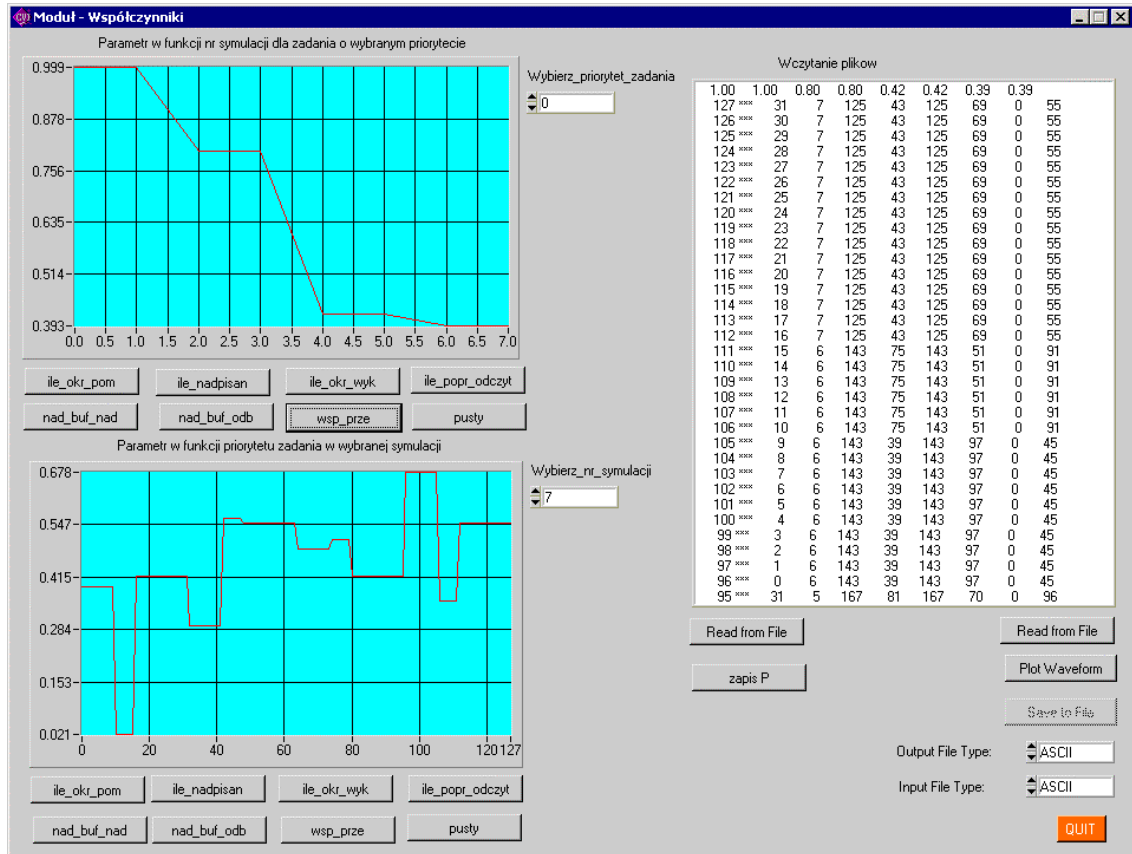
Dane wyjściowe modelu symulacyjnego umożliwiają obliczenie parametrów liczbowych i parametrów charakteryzowanych rozkładami (rozd. 5.2.7).

5.4. Realizacja modeli symulacyjnych

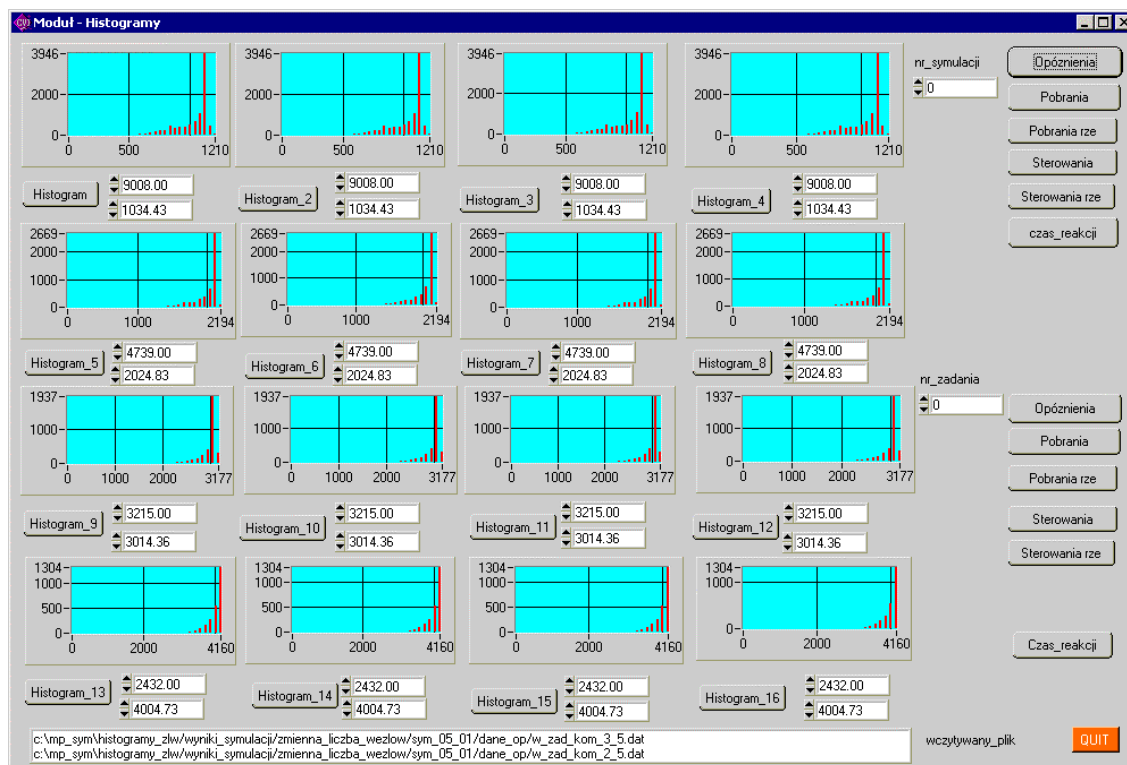
Na potrzeby przeprowadzenia badań oraz ekspozycji wyników opracowano 3 moduły programowe, które są przedstawione na rysunkach nr 5.11, 5.12 i 5.13. Moduł „symulacja” jest programem realizującym model symulacyjny. Został zrealizowany w dwóch wersjach dla metody przeglądania działań oraz dla metody planowania zdarzeń. Dla ustalonych wartości parametrów określających warunki symulacji moduł generuje pliki z wartościami współczynników dla zadań systemu oraz pliki z zarejestrowanymi opóźnieniami. Moduł „współczynniki” służy do ekspozycji wyników zarejestrowanych dla poszczególnych zadań systemu współczynników, oraz przeprowadza obliczenia w celu wyznaczenia współczynnika przejścia zadań. Moduł „histogramy” służy do prezentacji histogramów określonych opóźnień wybranego zadania systemu. Moduły programowe opracowano w środowisku LabWindows/CVI5.0 C for Virtual Instrumentation.



Rys. 5.11. Panel moduł symulacja



Rys. 5.12. Panel modułu współczynniki



Rys. 5.13. Panel modułu histogramy

5.5. Podsumowanie

Realizacja symulacji z wykorzystaniem modelu symulacyjnego zbudowanego zgodnie z zasadą planowania zdarzeń jest znacznie szybsza niż z wykorzystaniem zasady przeglądania działań. Zastosowanie kalendarza zdarzeń i odpowiednich procedur planowania zdarzeń powoduje, że podczas symulacji nie wykonuje się cykli, w których nie następuje żadne zdarzenie, lecz zgodnie z zawartością kalendarza zdarzeń, główny zegar symulacji przesuwają się do momentu wystąpienia kolejnego zdarzenia, uprzednio zaplanowanego i wpisanego do kalendarza

Można uznać, że model zbudowany wg zasady przeglądania działań posłużył do dokładnego prześledzenia wszystkich istotnych, z punktu widzenia symulacji, zależności przyczynowo skutkowych występujących w rzeczywistym systemie. Można także stwierdzić, że w pewnym sensie jest on także sposobem na zweryfikowanie wyników uzyskiwanych w symulatorze pracującym wg zasady planowania zdarzeń.

6. OCENA POPRAWNOŚCI DZIAŁANIA MODELI SYMULACYJNYCH

6.1. Metoda analityczna

6.1.1. Model analityczny

Podstawą oceny poprawności działania opracowanych i wykonanych modeli symulacyjnych był czas odpowiedzi zadania. Dla metody analitycznej zastosowano teorię szeregowania zadań, której zarys przedstawiono w rozdziale 3.3.

Dla pojedynczego współużytkowanego zasobu systemu umożliwia ona wyznaczenie wartości minimalnej czasu odpowiedzi R_{min} i wartości maksymalnej czasu odpowiedzi R_{max} [Mic00]. W przypadku, gdy realizacja zadania polega na realizacji kilku następujących po sobie zadań cząstkowych, wartość minimalną czasu odpowiedzi wyznacza się jako sumę minimalnych czasów odpowiedzi zadań cząstkowych, natomiast maksymalny czas odpowiedzi wyznacza się jako sumę maksymalnych czasów odpowiedzi zadań cząstkowych.

Do analitycznego wyznaczenia czasu odpowiedzi przyjęto strukturę systemu, w której jest realizowanych 16 zadań systemu o parametrach przedstawionych w tabeli 6.1. Każde zadanie systemu zawiera część pomiarową w postaci zadania realizowanego przez jeden z węzłów oraz część wykonawczą również realizowaną przez jeden z węzłów systemu. Wartości parametrów C i T są wyrażone w liczbie cykli zegara taktującego model. Realizacja pojedynczego zadania systemu jest związana z realizacją zadania komunikacyjnego czyli z przesłaniem danych przez magistralę systemu.

Tab. 6.1. Parametry zadań realizowanych w systemie

Nr zadania (priorytet)	Część pomiarowa		Część wykonawcza	
	T	C	T	C
1..4 (0..3)	1110	130	1110	130
5..8 (4..7)	2110	240	2110	240
9..12 (8..11)	3110	330	3110	330
13..16(12..15)	4110	410	4110	410

Założono, że części pomiarowe zadań systemu są zgrupowane w czterech węzłach. W tabeli 6.2 przedstawiono obciążenie kolejnych węzłów pomiarowych zadaniami, które są częściami pomiarowymi zadań systemu. W nawiasie podano priorytet danego zadania systemu.

Tab. 6.2. Obciążenie węzłów pomiarowych.

Nr węzła pomiarowego			
0	1	2	3
T	T	T	T
(priorytet)	(priorytet)	(priorytet)	(priorytet)
4110(12)	4110(13)	4110(14)	4110(15)
3110(8)	3110(9)	3110(10)	3110(11)
2110(4)	2110(5)	2110(6)	2110(7)
1110(0)	1110(1)	1110(2)	1110(3)

Części wykonawcze zadań systemu są zgrupowane w 8 węzłach wg schematu przedstawionego w tabeli 6.3.

Tab. 6.3. Obciążenie węzłów wykonawczych

Nr węzła wykonawczego							
4	5	6	7	8	9	10	11
T	T	T	T	T	T	T	T
(priorytet)	(priorytet)	(priorytet)	(priorytet)	(priorytet)	(priorytet)	(priorytet)	(priorytet)
1110(1)	1110(3)	2110(5)	2110(7)	3110(9)	3110(11)	4110(13)	4110(15)
1110(0)	1110(2)	2110(4)	2110(6)	3110(8)	3110(10)	4110(12)	4110(14)

Przy takim obciążeniu poszczególnych węzłów można mówić o węzłach pomiarowych, zawierających części pomiarowe zadań systemu, oraz o węzłach wykonawczych zawierających części wykonawcze zadań systemu. Każdy z węzłów jest obciążony dodatkowo przez dwa zadania lokalne. Ponadto założono, że zastosowano metodę dostępu do nośnika *peer to peer*, a zadania w węzłach i na magistrali komunikacyjnej są szeregowane wg metody RM (*Rate Monotonic*) bez wywłaszczania. Przyjęto również, że współczynnik wykorzystania magistrali u_m wynosi 0,5.

Model analityczny umożliwiający wyznaczenie minimalnego i maksymalnego czasu odpowiedzi dla przykładowego zadania nr 4 (R_{4min} , R_{4max}), dla przedstawionej struktury systemu jest określony zależnościami:

$$R_{4min} = R_{Z_3W_3min} + R_{Zk_4min} + R_{Z_4W_5min} \quad (6.1)$$

gdzie:

- $R_{Z_3W_3min}$ – minimalny czas odpowiedzi zadania nr 3 węzła nr 3,
- R_{Zk_4min} – minimalny czas odpowiedzi zadania komunikacyjnego nr 4,
- $R_{Z_4W_5min}$ – minimalny czas odpowiedzi zadania nr 4 węzła nr 5,

oraz

$$R_{4max} = R_{Z_3W_3max} + B_{Zk_4} + R_{Zk_4max} + R_{Z_4W_5max} \quad (6.2)$$

gdzie:

- $R_{Z_3W_3max}$ – maksymalny czas odpowiedzi zadania nr 3 węzła nr 3,
- R_{Zk_4max} – maksymalny czas odpowiedzi zadania komunikacyjnego nr 4,
- $R_{Z_4W_5max}$ – maksymalny czas odpowiedzi zadania nr 4 węzła nr 5,
- B_{Zk_4} – czas blokowania zadania komunikacyjnego nr 4 w buforze nadawczym określony jest zależnością

$$B_{Zk_4} = R_{Zk_{16max}} + R_{Zk_{12max}} + R_{Zk_{8max}} \quad (6.3)$$

gdzie:

- $R_{Zk_{16max}}$ - maksymalny czas odpowiedzi zadania komunikacyjnego nr 16,
- $R_{Zk_{12max}}$ - maksymalny czas odpowiedzi zadania komunikacyjnego nr 12,
- $R_{Zk_{8max}}$ - maksymalny czas odpowiedzi zadania komunikacyjnego nr 8.

Każdy z czasów R_i wyznaczany jest na podstawie wyrażenia rekurencyjnego (3.11).

Zadanie pomiarowe zadania systemu nr 4 jest realizowane jako zadanie nr 3 w węźle nr 3. Zadanie wykonawcze zadania systemu nr 4 jest realizowane jako zadanie nr 4 w węźle nr 5.

6.1.2. Wyniki obliczeń

Poniżej przedstawiono sposób obliczania R_{min} i R_{max} dla przykładowego zadania nr 4.

Obliczenia minimalnego i maksymalnego czasu odpowiedzi zadania pomiarowego R_{Z3W3} wykonano przy założonym obciążeniu węzła pomiarowego, przedstawionym w tabeli 6.4.

Tab. 6.4: Obciążenie węzła pomiarowego

Nr zadania	C	T	Typ zadania
1	50	500	lokalne
2	70	700	lokalne
3	130	1110	pomiarowe
4	240	2110	pomiarowe
5	330	3110	pomiarowe
6	410	4110	pomiarowe

Na podstawie wyrażenia rekurencyjnego (3.11) przeprowadzono w kolejnych iteracjach obliczenia, otrzymując:

$$R_{Z3W3}^0 = 0,$$

$$R_{Z3W3}^1 = 410 + 130 = 540,$$

$$R_{Z3W3}^2 = 540 + \left\lceil \frac{540}{500} \right\rceil 50 + \left\lceil \frac{540}{700} \right\rceil 70 = 540 + 100 + 70 = 710,$$

$$R_{Z3W3}^3 = 540 + \left\lceil \frac{710}{500} \right\rceil 50 + \left\lceil \frac{710}{700} \right\rceil 70 = 540 + 100 + 140 = 780,$$

$$R_{Z3W3}^4 = 540 + \left\lceil \frac{780}{500} \right\rceil 50 + \left\lceil \frac{780}{700} \right\rceil 70 = 540 + 100 + 140 = 780,$$

stąd:

$$R_{Z3W3min} = 540,$$

$$R_{Z3W3max} = 780.$$

Obliczenia minimalnego i maksymalnego czasu odpowiedzi zadania wykonawczego R_{Z4W4} wykonano przy założonym obciążeniu węzła wykonawczego przedstawionym w tabeli 6.5.

Tab. 6.5: Obciążenie węzła wykonawczego

Nr zadania	C	T	Typ zadania
1	50	500	lokalne
2	70	700	lokalne
3	130	1110	wykonawcze
4	130	1110	wykonawcze

Na podstawie wyrażenia rekurencyjnego (3.11) przeprowadzono w kolejnych iteracjach obliczenia, otrzymując:

$$R_{Z4W5}^0 = 0,$$

$$R_{Z4W5}^1 = 0 + 130 = 130,$$

$$R_{Z4W5}^2 = 130 + \left\lceil \frac{130}{500} \right\rceil 50 + \left\lceil \frac{130}{700} \right\rceil 70 + \left\lceil \frac{130}{1110} \right\rceil 130 = 130 + 50 + 70 + 130 = 380,$$

$$R_{Z4W5}^3 = 130 + \left\lceil \frac{380}{500} \right\rceil 50 + \left\lceil \frac{380}{700} \right\rceil 70 + \left\lceil \frac{380}{1110} \right\rceil 130 = 130 + 50 + 70 + 130 = 380,$$

stąd:

$$R_{Z4W5min} = 130,$$

$$R_{Z4W5max} = 380.$$

Obliczenia minimalnego i maksymalnego czasu odpowiedzi zadania komunikacyjnego R_{Zk4} wykonano przy założonym obciążeniu magistrali komunikacyjnej, przedstawionym w tabeli 6.6.

Tab. 6.6. Obciążenie magistrali komunikacyjnej

Liczba zadań	priorytet zadań	T	C
4	0..3	1110	64
4	4..7	2110	64
4	8..11	3110	64
4	12..15	4110	64

Na podstawie wyrażenia rekurencyjnego (3.11) przeprowadzono w kolejnych iteracjach obliczenia, otrzymując:

$$R_{Zk4}^0 = 0,$$

$$R_{Zk4}^1 = 64 + 64 = 128,$$

$$R_{Zk4}^2 = 128 + \left(\left\lceil \frac{128}{1110} \right\rceil 64 \right) 3 = 320,$$

$$R_{Zk4}^3 = 128 + \left(\left\lceil \frac{320}{1110} \right\rceil 64 \right) 3 = 320,$$

stąd:

$$R_{Zk4min} = 128,$$

$$R_{Zk4max} = 320.$$

Czas blokowania zadania komunikacyjnego nr 4 został obliczony przy założeniu, że przed zrealizowaniem zadania komunikacyjnego nr 4 należy wykonać wszystkie zadania komunikacyjne, które współużytkują z zadaniem komunikacyjnym nr 4 bufor komunikacyjny nadawczy węzła. Są to zadania nr 16, 12 i 8.

Obliczenia czasu odpowiedzi zadania komunikacyjnego nr 16 R_{Zk16} , przy założonym obciążeniu magistrali komunikacyjnej przedstawionym w tabeli 6.6, przeprowadzono na podstawie wyrażenia rekurencyjnego (3.11) i w kolejnych iteracjach otrzymano:

$$R_{Zk16}^0 = 0,$$

$$R_{Zk16}^1 = 64 + 64 = 128,$$

$$R_{Zk16}^2 = 128 + \left(\left\lceil \frac{128}{1110} \right\rceil 64 + \left\lceil \frac{128}{2110} \right\rceil 64 + \left\lceil \frac{128}{3110} \right\rceil 64 + \left\lceil \frac{128}{4110} \right\rceil 64 \right) 3 = 896,$$

$$R_{Zk16}^3 = 128 + \left(\left\lceil \frac{896}{1110} \right\rceil 64 + \left\lceil \frac{896}{2110} \right\rceil 64 + \left\lceil \frac{896}{3110} \right\rceil 64 + \left\lceil \frac{896}{4110} \right\rceil 64 \right) 3 = 896,$$

stąd:

$$R_{Zk16max} = 896.$$

Obliczenia czasu odpowiedzi zadania komunikacyjnego nr 12 R_{Zk12} , przy założonym obciążeniu magistrali komunikacyjnej przedstawionym w tabeli 6.6, przeprowadzono na podstawie wyrażenia rekurencyjnego (3.11) i w kolejnych iteracjach otrzymano:

$$R_{Zk12}^0 = 0,$$

$$R_{Zk12}^1 = 64 + 64 = 128,$$

$$R_{Zk12}^2 = 128 + \left(\left\lceil \frac{128}{1110} \right\rceil 64 + \left\lceil \frac{128}{2110} \right\rceil 64 + \left\lceil \frac{128}{3110} \right\rceil 64 \right) 3 = 704,$$

$$R_{Zk12}^3 = 128 + \left(\left\lceil \frac{704}{1110} \right\rceil 64 + \left\lceil \frac{704}{2110} \right\rceil 64 + \left\lceil \frac{704}{3110} \right\rceil 64 \right) 3 = 704,$$

stąd:

$$R_{Zk12max} = 704.$$

Obliczenia czasu odpowiedzi zadania komunikacyjnego nr 8 R_{Zk8} , przy założonym obciążeniu magistrali komunikacyjnej przedstawionym w tabeli 6.6, przeprowadzono na podstawie wyrażenia rekurencyjnego (3.11) i w kolejnych iteracjach otrzymano:

$$R_{Zk8}^0 = 0,$$

$$R_{Zk8}^1 = 64 + 64 = 128,$$

$$R_{Zk8}^2 = 128 + \left(\left\lceil \frac{128}{1110} \right\rceil 64 + \left\lceil \frac{128}{2110} \right\rceil 64 \right) 3 = 512,$$

$$R_{Zk8}^3 = 128 + \left(\left\lceil \frac{512}{1110} \right\rceil 64 + \left\lceil \frac{512}{1110} \right\rceil 64 \right) 3 = 512,$$

stąd:

$$R_{Zk8max} = 512.$$

Stąd czas blokowania zadania komunikacyjnego nr 4, zgodnie z zależnością (6.3), wyniesie:

$$B_{Zk4} = 896 + 704 + 512 = 2112.$$

Na podstawie powyższych obliczeń minimalny czas reakcji zadania systemu nr 4, wyznaczony zgodnie z zależnością (6.1), wynosi:

$$R_{4min} = 540 + 128 + 130 = 798,$$

a maksymalny czas reakcji zadania nr 4, wyznaczony zgodnie z zależnością, (6.2) wynosi:

$$R_{4max} = 780 + 2112 + 320 + 380 = 3592.$$

Wyznaczony na podstawie modeli symulacyjnych, dla identycznych wartości parametrów opisujących warunki symulacji, minimalny i maksymalny czas odpowiedzi wynosi odpowiednio:

$$R'_{4min} = 1370 \text{ oraz } R'_{4max} = 1490$$

6.1.3. Podsumowanie

Wartości maksymalnego czasu reakcji zadania systemu nr 4 wyznaczona z wykorzystaniem teorii szeregowania zadań jest większa od maksymalnego czasu reakcji zarejestrowanego podczas symulacji. Wartość minimalnego czasu reakcji zadania systemu nr 4 wyznaczona z wykorzystaniem teorii szeregowania zadań jest mniejsza od minimalnego czasu reakcji zarejestrowanego podczas symulacji.

Wyznaczanie minimalnego czasu reakcji zadania systemu odbywało się przy założeniu, że w każdym elemencie systemu występuje tylko czas blokowania równy maksymalnemu czasowi wykonania zadania o niższym priorytecie. Wyznaczenie maksymalnego czasu reakcji zadania odbywało się przy założeniu, że poza uwzględnionym już blokowaniem zadania należy uwzględnić także czasy wykonania zadań o wyższych priorytetach. Takie podejście, określane jako analiza najgorszego przypadku, prowadzi do wyników które mogą znacznie odbiegać od wartości osiągniętych w rzeczywistym systemie.

Podobne analizy przeprowadzono dla pozostałych zadań, które prowadziły do podobnych wniosków.

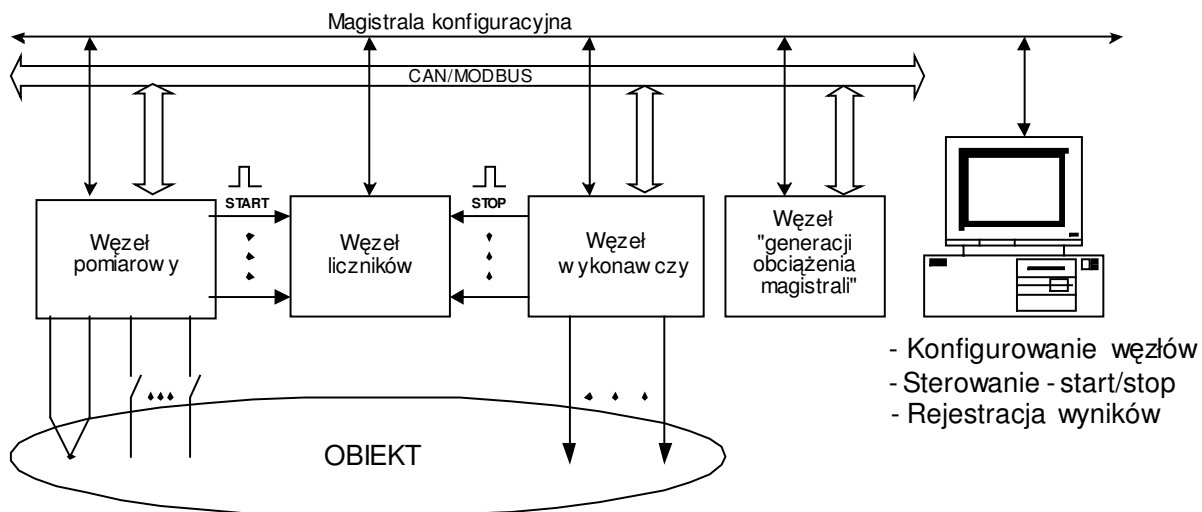
Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, że model symulacyjny jest poprawny.

6.2. Metoda doświadczalna

6.2.1. Model fizyczny RSPS

W celu wykonania pomiarów opóźnień w transmisji danych w rzeczywistym systemie zbudowano model fizyczny RSPS, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 6.1.

a)



b)



Rys. 6.1. Model fizyczny RSPS
a). schemat blokowy, b). zdjęcie modelu fizycznego

Model fizyczny RSPS składa się z czterech węzłów: węzła pomiarowego, węzła wykonawczego, węzła symulującego obciążenie magistrali poprzez pozostałe węzły docelowego systemu oraz węzła liczników [Mar05]. W skład modelu fizycznego wchodzi także komputer klasy PC z oprogramowaniem przeznaczonym do konfigurowania pracy poszczególnych węzłów oraz rejestracji przeprowadzonych pomiarów.

Każdy z węzłów modelu fizycznego jest podłączony do trzech magistral komunikacyjnych:

- magistrali konfiguracyjnej,
- magistrali systemu docelowego pracującej w systemie *master - slave*,
- magistrali systemu docelowego pracującej w systemie *peer to peer*.

Model fizyczny umożliwia po odpowiednim skonfigurowaniu węzłów zbadanie histogramu opóźnień w transmisji danych dla wybranego zadania stawianego przed systemem.

Konfiguracja węzła pomiarowego i węzła wykonawczego polega na określeniu:

- liczby zadań wykonywanych przez węzeł,
- okresu występowania i czasu realizacji poszczególnych zadań,
- metody szeregowania zadań stosowanej przez procesor węzła,
- typu każdego zadania,
- powiązania zadań pomiędzy węzłami,
- priorytetu zadania systemu (metoda *peer to peer*),
- szybkości transmisji danych na magistrali.

Konfiguracja węzła symulującego obciążenie magistrali poprzez pozostałe węzły docelowego systemu polega na określeniu w przypadku metody *peer to peer* okresu występowania oraz priorytetu pozostałych zadań, natomiast w przypadku metody *master - slave* polega na określeniu scenariusza wymian dla całego systemu.

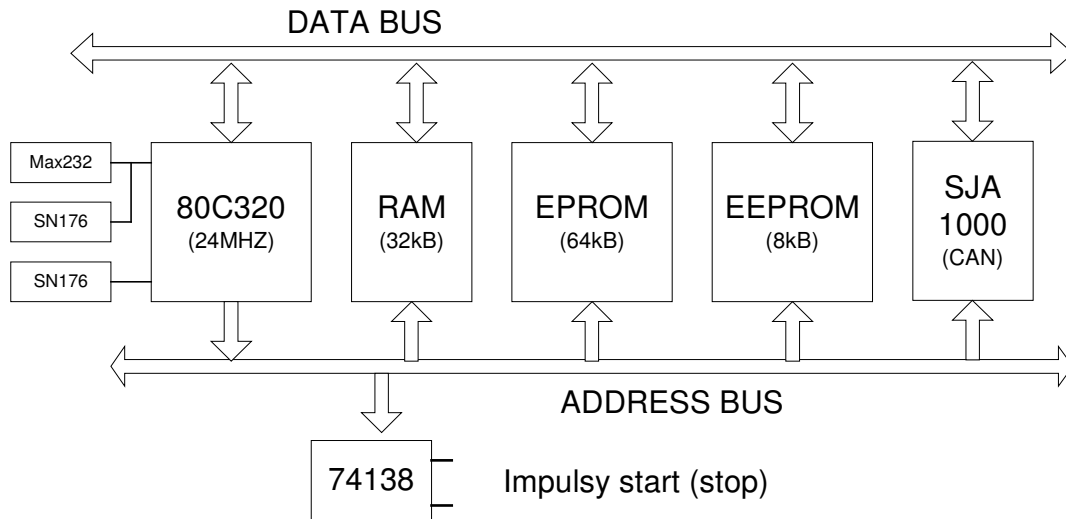
Pomiar opóźnienia polega na pomiarze odstępu czasu od wystąpienia impulsu na wejściu *start* jednego z liczników do momentu wykrycia impulsu na wejściu *stop* tego samego licznika. Impuls *start* wystawiany jest przez węzeł pomiarowy, natomiast impuls *stop* wystawiany jest przez węzeł wykonawczy.

Węzeł liczników zawiera 8 liczników. W trakcie przesyłania danych pomiędzy węzłem pomiarowym a węzłem wykonawczym każda ramka komunikacyjna w polu danych otrzymuje swój identyfikator, na podstawie którego węzeł wykonawczy generuje impuls stop odpowiedniego licznika.

Węzeł generacji obciążenia magistrali dla metody *peer to peer* w zadanych odstępach czasu generuje ramki komunikacyjne symulujące obecność pozostałych węzłów docelowego systemu. Dla metody *master - slave* węzeł ten spełnia rolę węzła master i według zadanego scenariusza wymian pobiera dane z węzła pomiarowego i przesyła je do węzła wykonawczego.

Struktura węzłów modelu fizycznego

Strukturę węzła pomiarowego i wykonawczego przedstawiono na rys. 6.2. Podstawowym elementem węzła pomiarowego i wykonawczego jest mikrokomputer jednokładowy 80C320, który współpracuje z pamięcią programu (EPROM 64kB) i pamięcią danych (RAM 32kB). Do współpracy z magistralą konfiguracyjną i magistralą systemu docelowego wg zasady *master - slave* przewidziano układy standardu RS 232 (MAX232) oraz standardu RS 485 (SN176).

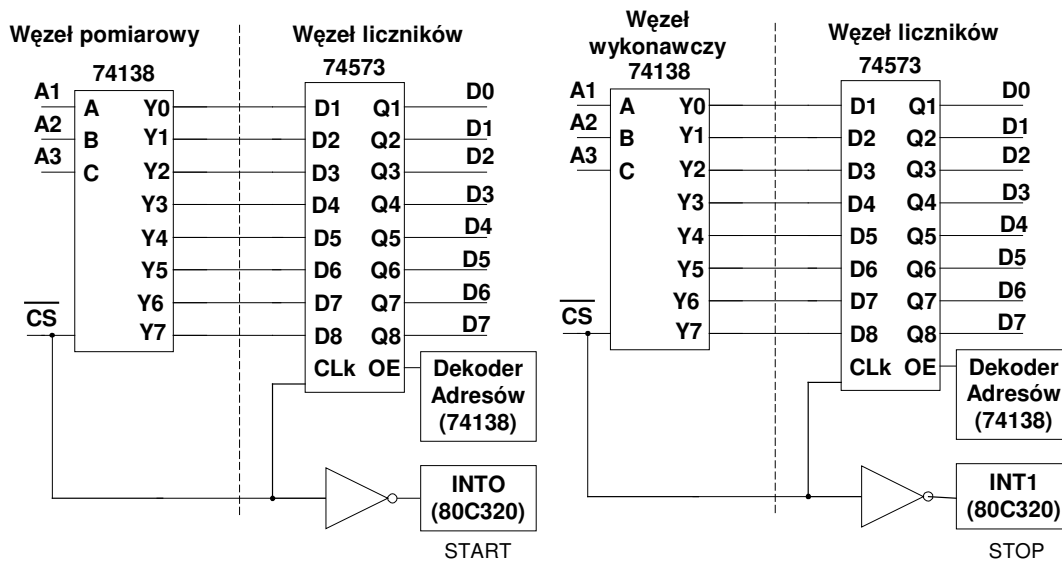


Rys. 6.2. Struktura węzła pomiarowego i wykonawczego

Współpraca z magistralą systemu docelowego z zasadą dostępu *peer to peer* jest zrealizowana za pośrednictwem procesora komunikacyjnego SJA1000 (CAN). Dodatkowo węzeł jest wyposażony w dekodery 74138 przeznaczony do realizacji funkcji pomiarowych (wystawianie impulsu *start* i *stop*). Węzeł symulujący obciążenie magistrali nie zawiera dekodera 74138 do realizacji funkcji pomiarowych, natomiast węzeł liczników ma rozbudowaną pamięć danych.

Zasada przeprowadzenia pomiaru

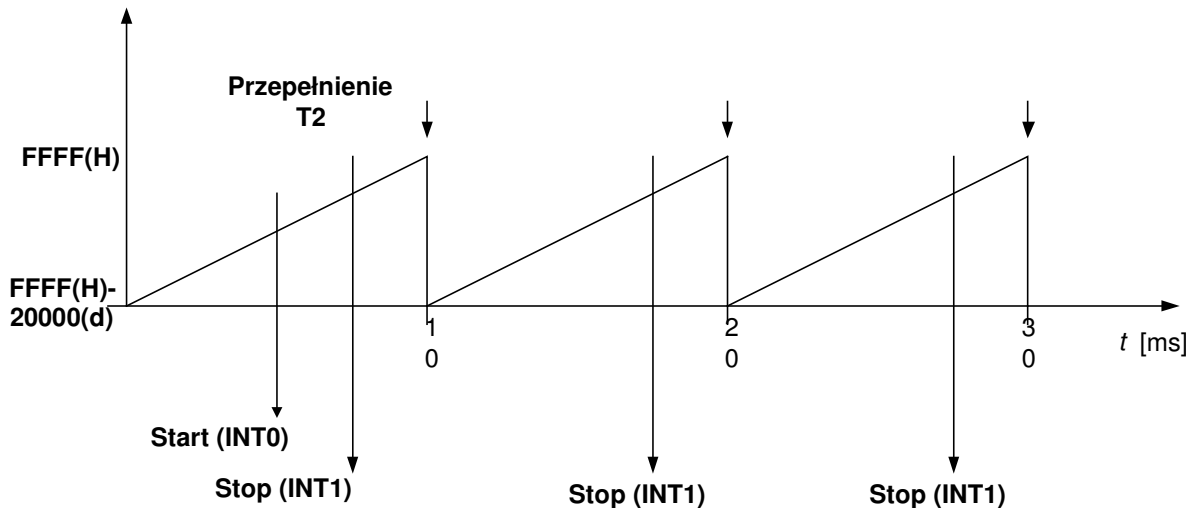
Pomiar opóźnienia polega na zliczaniu impulsów $0,5 \mu s$ od momentu wystawienia impulsu *start* do momentu wystawienia impulsu *stop*. Impuls *start* jest wystawiany przez węzeł pomiarowy w momencie wpisywania danych przeznaczonych do przesłania bo bufora nadawczego węzła pomiarowego, natomiast impuls *stop* jest wystawiany przez węzeł wykonawczy w momencie odczytywania danych z bufora odbiorczego węzła. Układowa realizacja generowania i obsługi impulsu *start* i *stop* jest przedstawiona na rys. 6.3.



Rys. 6.3. Generacja i obsługa impulsów start i stop

Odwołanie do adresu, pod którym umieszczony jest układ dekodera 74138 jest równoznaczne z pojawieniem się ujemnego impulsu na linii CS. W zależności od stanu linii adresowych A1, A2, A3 na jednym z wyjść Y0...Y7 pojawia się ujemny impuls. Ujemny impuls CS powoduje także zapamiętanie stanu wyjść dekodera 74138 w zatrzasku 74573 oraz zgłoszenie przerwania zewnętrznego w mikroprocesorze węzła liczników. Realizacja jest identyczna dla impulsu *start* i *stop* z tą różnicą, że z impulsem *start* związane jest zewnętrzne przerwanie INT0 natomiast z impulsem *stop* przerwanie INT1.

Dla każdego pomiaru zapamiętywany jest stan licznika w momencie wystawienia impulsu *start*, stan licznika w momencie wystawienia impulsu *stop* oraz liczba przepełnień pomiędzy wymienionymi impulsami. Zasadę wyznaczenia opóźnienia przedstawiono na rys. 6.4.



Rys. 6.4. Zasada wyznaczenia opóźnienia

W pierwszej kolejności uwzględniając liczbę zarejestrowanych przepełnień licznika L_p , należy wyznaczyć liczbę zliczonych impulsów L_i .

Gdy $L_p = 0$ liczbę impulsów wyznaczmy jako:

$$L_i = T2(stop) - T2(start), \quad (6.5)$$

gdzie:

- $T2(start)$ – stan wewnętrznego licznika T2 (80C320) w momencie wystawienia impulsu *start*,
- $T2(stop)$ – stan wewnętrznego licznika T2 (80C320) w momencie wystawienia impulsu *stop*.

Gdy $L_p = 1$ liczbę impulsów wyznaczmy jako:

$$L_i = (FFFF(H) - T2(stop)) + (T2(start) - B1DF(H)), \quad (6.6)$$

gdzie:

- $FFFF(H)$ – stan, w którym następuje przeładowanie licznika T2,
- $B1DF(H)$ – stan, od którego rozpoczyna się zliczanie impulsów w liczniku T2.

Gdy $L_p > 1$ liczbę impulsów wyznaczmy jako:

$$L_i = (FFFF(H) - T2(stop)) + (T2(start) - B1DF(H)) + 20000(d)(L_p - 1). \quad (6.7)$$

Wartość opóźnienia R jest wyznaczana jako:

$$R = \frac{1}{2} L_i [\mu s] \quad (6.8)$$

Konfiguracja węzłów modelu fizycznego

W badaniach jest brana pod uwagę struktura systemu, w której należy zrealizować 16 zadań o parametrach przedstawionych w tabeli 6.7. Każde zadanie systemu zawiera część pomiarową w postaci zadania realizowanego przez jeden z węzłów oraz część wykonawczą również realizowaną przez jeden z węzłów systemu. Realizacja pojedynczego zadania systemu jest związana z przesłaniem danych przez magistralę systemu. Dostęp do medium komunikacyjnego odbywa się z wykorzystaniem priorytetów wg zasady *peer to peer*.

Tab. 6.7. Parametry zadań realizowanych w systemie

Nr zadania (priorytet)	Część pomiarowa		Część wykonawcza	
	T[ms]	C[ms]	T[ms]	C[ms]
1..4 (0..3)	11,2	1,4	11,2	1,4
5..8 (4..7)	21,2	2,4	21,2	2,4
9..12 (8..11)	31,2	3,4	31,2	3,4
13..16(12..15)	41,2	4,2	41,2	4,2

Do przeprowadzenia pomiarów przyjęto następującą strukturę systemu. Wszystkie zadania pomiarowe zgrupowano w 4 węzłach, natomiast zadania wykonawcze zgrupowano w 8 węzłach. Zadania w węzłach szeregowane są wg zasady RM. W tabeli 6.8 przedstawiono obciążenie kolejnych węzłów pomiarowych zadaniami, które są częściami pomiarowymi zadań systemu. W nawiasie podano priorytet danego zadania systemu.

Tab. 6.8. Obciążenie węzłów pomiarowych

Numer węzła pomiarowego			
0	1	2	3
T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)
41,2(12)	41,2(13)	41,2(14)	41,2(15)
31,2(8)	31,2(9)	31,2(10)	31,2(11)
21,2(4)	21,2(5)	21,2(6)	21,2(7)
11,2(0)	11,2(1)	11,2(2)	11,2(3)

W tabeli 6.9 przedstawiono obciążenie kolejnych węzłów wykonawczych zadaniami, które są częściami wykonawczymi zadań systemu. W nawiasie podano priorytet danego zadania systemu.

Tab. 6.9. Obciążenie węzłów wykonawczych

Numer węzła wykonawczego							
4	5	6	7	8	9	10	11
T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)
11,2(1)	11,2(3)	21,2(5)	21,2(7)	31,2(9)	31,2(11)	41,2(13)	41,2(15)
11,2(0)	11,2(2)	21,2(4)	21,2(6)	31,2(8)	31,2(10)	41,2(12)	41,2(14)

Pomiar opóźnienia w transmisji danych przeprowadzono dla zadania systemu o wartości priorytetu 3. Stąd wynika obciążenie poszczególnych węzłów modelu fizycznego. Węzeł pomiarowy powinien zrealizować zadania węzła nr 3 z tabeli 6.8, natomiast węzeł wykonawczy powinien zrealizować zadania węzła nr 5 z tabeli 6.9. Węzeł symulujący obciążenie magistrali komunikacyjnej przez pozostałe węzły systemu powinien zrealizować zadania pomiarowe przypisane węzłom nr 0,1 i 2 z tabeli 6.8.

Obciążenie węzła pomiarowego przedstawiono w tabeli 6.10. Poza wymienionymi zadaniami pomiarowymi węzeł realizuje jeszcze dwa zadania lokalne. W nawiasie podano priorytet zadania systemu.

Tab. 6.10. Obciążenie węzła pomiarowego

Nr zadania	Typ zadania	T[ms]	C[ms]	C/T
1	lokalne	5	0,6	0,1
2	lokalne	7	0,8	0,1
3	pomiarowe	11,2(3)	1,4	0,11
4	pomiarowe	21,2(7)	2,4	0,11
5	pomiarowe	31,2(11)	3,4	0,10
6	pomiarowe	41,2(15)	4,2	0,09
			u_w	0,63

Obciążenie węzła symulującego pozostałe węzły systemu przedstawiono w tabeli 6.11.

Tab. 6.11. Obciążenie węzła symulującego pozostałe węzły

Nr zadania	Typ zadania (priorytet)	T [ms]	C [ms]
1	pomiarowe(0)	11,2	1,4
2	pomiarowe(4)	21,2	2,4
3	pomiarowe(8)	31,2	3,4
4	pomiarowe(12)	41,2	4,2
5	pomiarowe(1)	11,2	1,4
6	pomiarowe(5)	21,2	2,4
7	pomiarowe(9)	31,2	3,4
8	pomiarowe(13)	41,2	4,2
9	pomiarowe(2)	11,2	1,4
10	pomiarowe(6)	21,2	2,4
11	pomiarowe(9)	31,2	3,4
12	pomiarowe(14)	41,2	4,2

Obciążenie węzła wykonawczego przedstawiono w tabeli 6.12. Poza wymienionymi zadaniami wykonawczymi węzeł realizuje jeszcze dwa zadania lokalne. W nawiasie podano priorytety zadań systemu.

Tab. 6.12. Obciążenie węzła wykonawczego

Nr zadania	Typ zadania	T[ms]	C[ms]	C/T
1	Lokalne	5	0,6	0,12
2	lokalne	7	0,8	0,11
3	wykonawcze	11,2(2)	1,4	0,12
4	wykonawcze	11,2(3)	1,4	0,11
			$u_w=$	0,47

Wykorzystanie magistrali

Z realizacją każdego zadania systemu związana jest realizacja zadania komunikacyjnego. Okres występowania zadania komunikacyjnego T jest równy okresowi występowania zadania pomiarowego przynależnego do tego samego zadania systemu. Czas realizacji zadania komunikacyjnego zależy od wybranej metody dostępu do magistrali komunikacyjnej, szybkości transmisji danych na magistrali oraz od budowy ramki komunikacyjnej.

Przyjęto, że szybkość transmisji danych na magistrali będzie równa 100kbps. Układ priorytetów, liczbę bitów przesyłanych w ramach każdego zadania komunikacyjnego, długość ramki komunikacyjnej, liczbę wymian realizowanych w jednostce czasu dla każdego zadania komunikacyjnego, zapotrzebowanie na przepustowość komunikacyjną przedstawiono w tabeli 6.13.

Tab. 6.13. Zapotrzebowanie na przepustowość komunikacyjną

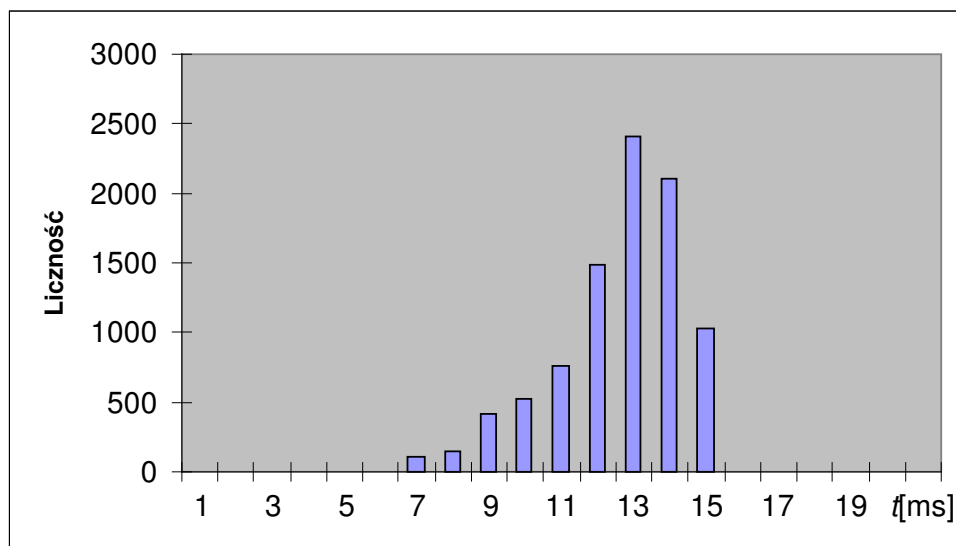
Liczba zadań (priorytet)	T [ms]	Liczba bitów	Dł. ramki komunikacyjnej	Liczba wymian	Zapotrzebowanie na przepustowość kom. [bit/s]
4(0..3)	11,2	16	64	89	22857
4(4..7)	21,2	16	64	47	12075
4(8..11)	31,2	16	64	32	8205
4(12..15)	41,2	16	64	24	6214
				Suma	49351

Przydział priorytetów odbywa się wg zasady RM. Najwyższy priorytet otrzymują zadania o najkrótszym okresie występowania. W przypadku równych okresów występowania o nadaniu priorytetu decyduje nr porządkowy węzła. Założono, że ramka komunikacyjna składa się z 64 bitów transmisyjnych.

Zapotrzebowanie na przepustowość komunikacyjną wynosi w przybliżeniu 50kb/s. Przy założonej szybkości transmisji danych równej 100kb/s współczynnik wykorzystania magistrali $u_m=0,5$.

6.2.2. Wyniki badań

W trakcie pomiarów zarejestrowano 9000 realizacji zadań systemu. Na rys. 6.5 przedstawiono zarejestrowany histogram opóźnienia w transmisji danych dla zadania systemu o wartości priorytetu 3. W kolejnych realizacjach zadania był przeprowadzany pomiar odstępu czasu od momentu wpisania danych do bufora nadawczego węzła pomiarowego do momentu odczytu danych z bufora odbiorczego węzła wykonawczego. Wpisanie danych do bufora nadawczego odbywało się w końcowej fazie realizacji zadania pomiarowego. Odczyt danych z bufora odbiorczego następował także w fazie końcowej realizacji zadania wykonawczego.



Rys. 6.5. Histogram opóźnień w transmisji danych zarejestrowany w modelu fizycznym

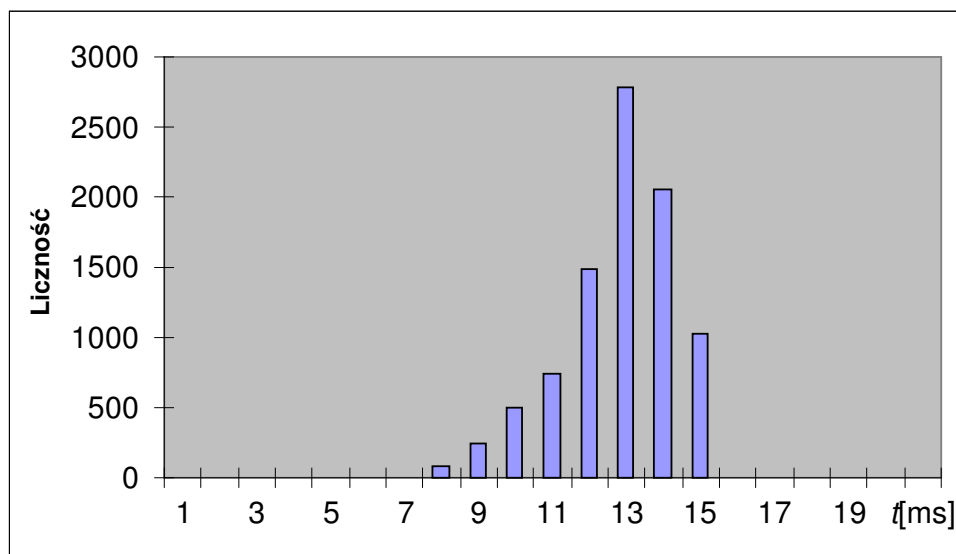
W tabeli 6.14 zamieszczono zarejestrowaną wartość minimalną i maksymalną opóźnienia w transmisji danych otrzymane w wyniku badania modelu fizycznego oraz wyznaczoną wartość średnią tego opóźnienia.

Tab. 6.14. Wartość minimalna, średnia i maksymalna opóźnienia dla modelu fizycznego

τ_{min} [ms]	τ_{sr} [ms]	τ_{max} [ms]
6,91	11,934	13,610

W podobnych warunkach w jakich były przeprowadzane pomiary opóźnień w transmisji danych przy zastosowaniu modelu fizycznego zostały przeprowadzane badania z zastosowaniem modeli symulacyjnych.

Na rys. 6.6 przedstawiono histogram opóźnień w transmisji danych zarejestrowany z wykorzystaniem modeli symulacyjnych z metodą przeglądania działań i planowania zdarzeń. W obu przypadkach otrzymano identyczne histogramy.



Rys. 6.6. Histogram opóźnień w transmisji danych zarejestrowany przy użyciu modeli symulacyjnych

W tabeli 6.15 zamieszczono zarejestrowaną wartość minimalną, średnią i maksymalną opóźnienia w transmisji danych w modelach symulacyjnych

Tab. 6.15. Wartość minimalna, średnia i maksymalna opóźnienia w modelu symulacyjnym

τ_{min} [ms]	τ_{sr} [ms]	τ_{max} [ms]
6,81	12,17	14,01

6.2.3. Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono model fizyczny do pomiaru opóźnień w transmisji danych w rozproszonych systemach pomiarowo – sterujących wykorzystujących jako swoją infrastrukturę komunikacyjną popularne sieci przemysłowe o metodzie dostępu *master – slave* i *peer to peer*. Po odpowiednim skonfigurowaniu węzłów składowych systemu jest możliwe wyznaczenie histogramu opóźnień dla wybranego zadania komunikacyjnego w systemie.

Wartości opóźnień uzyskane w czasie pomiarów w modelu fizycznym zostały porównane z wartościami opóźnień uzyskanymi z wykorzystaniem tak samo skonfigurowanych modeli symulacyjnych.

Z rys. 6.5 i rys. 6.6 wynika, że kształty obu histogramów są podobne. Są to histogramy prawostronnie asymetryczne i jednomodalne. Różnice polegające na mniejszej wartości minimalnej i większej wartości maksymalnej w histogramie uzyskanym w modelu fizycznym wynikają z pewnych uproszczeń przyjętych podczas budowy modelu symulacyjnego, wśród których można wymienić:

- nieuwzględnienie narzutu czasowego związanego z przełączaniem zadań w węzłach,
- nieuwzględnienie podprogramu współpracującego z procesorem komunikacyjnym,
- opóźnień samego procesora komunikacyjnego.

Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, że model symulacyjny jest poprawny.

7. BADANIA SYMULACYJNE ROZPROSZONYCH SYSTEMÓW POMIAROWO – STERUJACYCH

7.1. Program badań

Istnieje wiele możliwych struktur oraz konfiguracji RSPS, które mogą podlegać badaniom symulacyjnym. Model symulacyjny powinien być na tyle uniwersalny, aby w szerokim zakresie umożliwić przeprowadzenie takich badań. Jednak zazwyczaj badania symulacyjne zostają przez projektanta systemu ograniczone do kilku określonych przypadków. Wynika to z tego, że specyfika projektowanego systemu narzuca określoną jego strukturę i liczbę zadań realizowanych w systemie.

Opracowane i wykonane modele symulacyjne, oparte o metody przeglądania działań i planowania zdarzeń, umożliwiają prowadzenie badań symulacyjnych RSPS w szerokim zakresie. W pracy przedstawiono przykładowe wyniki badań symulacyjnych określające:

- wpływ liczby zadań systemu,
- wpływ struktury systemu i struktury węzła

na właściwości RSPS.

7.2. Wyniki badań

7.2.1. Wpływ liczby zadań systemu na właściwości rozproszonego systemu pomiarowo - sterującego

Celem przeprowadzonych badań symulacyjnych było określenie wpływu zwiększania liczby zadań wykonywanych w RSPS, przy stałej liczbie węzłów, na utratę danych oraz wskazanie, w którym miejscu systemu utrata danych następuje. Parametrem charakteryzującym utratę danych jest współczynnik przejścia zadania (k_p) określony zależnością (5.1). Wartość współczynnika przejścia $k_p=0$ dla określonego zadania oznacza, że w danej symulacji zadanie o danym priorytecie nie jest realizowane. Wartość współczynnika $k_p=1$ oznacza pełne wykonanie wszystkich aktywacji zadania, a dla $0 < k_p < 1$ z wszystkich aktywacji zadania w pełni wykonywana jest tylko ich część.

Parametryzacja modelu systemu

Badania, określające wpływ liczby zadań RSPS na jego właściwości, przeprowadzono przy następujących podstawowych założeniach:

- liczba węzłów badanego systemu: 32,
- liczba zadań realizowanych przez węzły: 8,
- metoda szeregowania zadań w węzłach: RM bez wywłaszczania,
- liczba zadań realizowanych w systemie: do 128,
- liczba zadań systemu realizowanych w kolejnych symulacjach: 16, 32, 48, 64, 80, 96, 112, 128;
- metoda dostępu do medium transmisyjnego: *peer to peer*,
- czas symulacji: 10 mln cykli zegara taktującego model.

Przyjęto również, że obciążenia poszczególnych węzłów są identyczne. Parametry zadań poszczególnych węzłów zostały przedstawione w tabeli 7.1. Parametry wyrażone są w liczbach cykli zegara taktującego model. W tabeli podano także wartość współczynnika wykorzystania węzła u_w .

Tab. 7.1. Obciążenie węzła

Nr zadania	T	C	C/T
0	10100	700	0,069
1	20100	1600	0,079
2	30100	2500	0,083
3	40100	3400	0,084
4	50100	4300	0,085
5	60100	5200	0,086
6	70100	6100	0,087
7	80100	7100	0,088
u_w			0,664

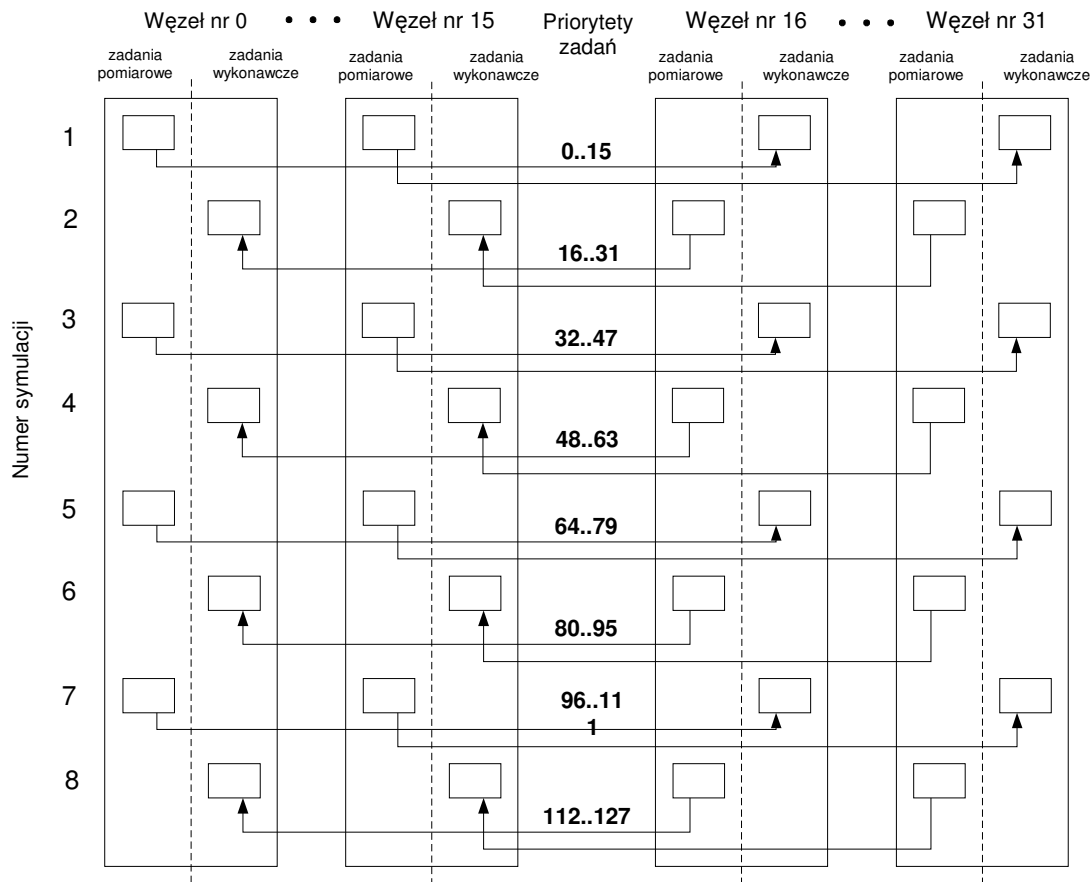
Założono również, że zadania systemu tworzą pary zadań węzłów wg zestawienia przedstawionego w tabeli 7.2. W kolejnych symulacjach dodawano kolejne zadania systemu wg zawartości wierszy z tabeli 7.2. Zadania w węzłach tworzą naprzemiennie część pomiarową i wykonawczą zadań systemu. Na rys. 7.1 przedstawiono grupy zadań i ich priorytety w kolejnych symulacjach.

Tab. 7.2. Zadania systemu w kolejnych symulacjach

Zadanie systemu	Grupa	Część pomiarowa		Część wykonawcza	
		Nr węzła	Zadanie	Nr węzła	Zadanie
0..15	A	0..15	0	16..31	0
16..31	B	16..31	1	0..15	1
32..47	C	0..15	2	16..31	2
48..63	D	16..31	3	0..15	3
64..79	E	0..15	4	16..31	4
80..95	F	16..31	5	0..15	5
96..111	G	0..15	6	16..31	6
112..127	H	16..31	7	0..15	7

W trakcie dodawania kolejnych zadań systemu, przy takim skonfigurowaniu węzłów, zmienia się charakter wykorzystania buforów komunikacyjnych w węzłach. Dla grupy A i B bufor będą wykorzystywane przez jedno zadanie systemu. Po dodaniu grupy C i kolejnych, poszczególne bufor będą już wykorzystywane przez kilka zadań systemu. Dodawanie kolejnych zadań systemu jest związane z zmianą typu zadania realizowanego przez węzeł, z zadania lokalnego na zadanie pomiarowe lub na zadanie wykonawcze. Umożliwia to zapewnienie stałego obciążenia węzłów w kolejnych symulacjach.

Z realizacją każdego zadania systemu łączy się realizacja zadania komunikacyjnego. Liczba zadań komunikacyjnych w kolejnych symulacjach wynosi tak jak w przypadku zadań systemu: 16, 32, 48, 64, 80, 96, 112, 128. Parametry zadań komunikacyjnych przedstawiono w tabeli 7.3. Okres występowania zadania komunikacyjnego jest równy okresowi występowania zadania pomiarowego przynależnego do tego samego zadania systemu. Czas realizacji C zadania komunikacyjnego zależy od przyjętej metody dostępu do magistrali komunikacyjnej i ilości danych do przesłania w ramach każdego zadania komunikacyjnego. W przeprowadzanych symulacjach przyjęto metodę dostępu do nośnika *peer to peer*, oraz przyjęto, że w ramach każdego zadania komunikacyjnego jest przesyłanych 16 bitów danych. W konsekwencji czas realizacji każdego zadania jest stały i wynosi 64 cykle zegara taktującego model.

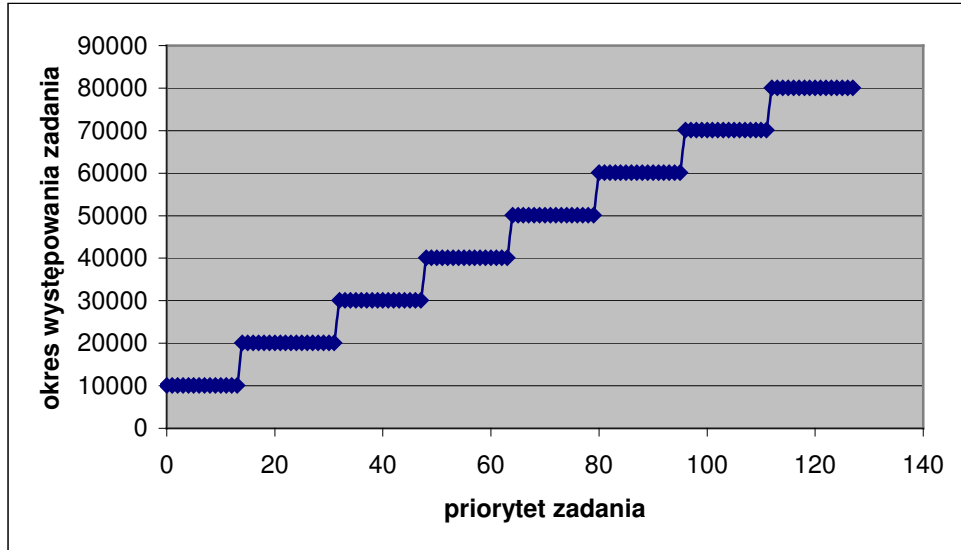


Rys. 7.1. Grupy zadań i ich priorytety w kolejnych symulacjach

Tab. 7.3. Parametry zadań komunikacyjnych.

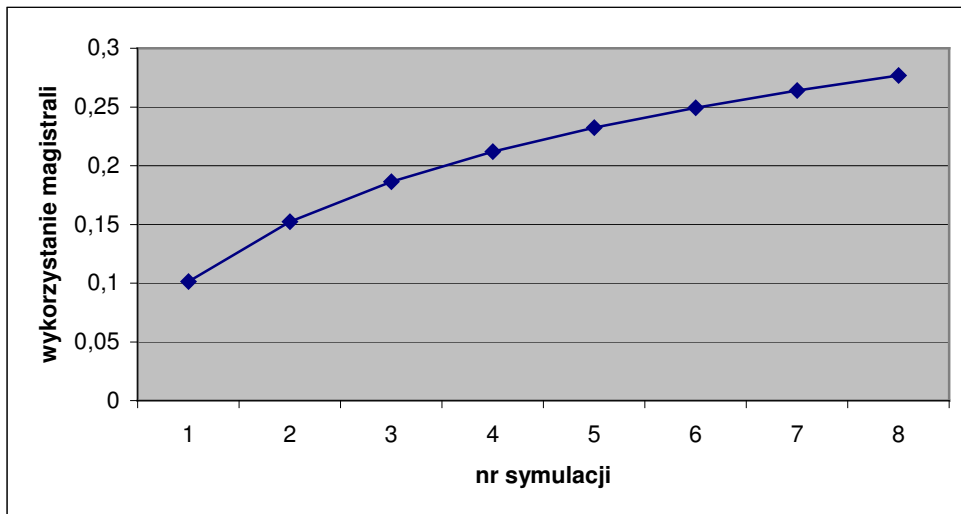
Liczba zadań	priorytet zadań	Liczba bitów do przesłania	T	C	C/T dla zadania	C/T dla wszystkich zadań
16	0..15	16	10100	64	0,006	0,101
16	16..31	16	20100	64	0,003	0,051
16	32..47	16	30100	64	0,002	0,034
16	48..63	16	40100	64	0,002	0,026
16	64..79	16	50100	64	0,001	0,020
16	80..95	16	60100	64	0,001	0,017
16	96..111	16	70100	64	0,001	0,015
16	112..127	16	80100	64	0,001	0,013
u_m						0,277

Przydział priorytetów do zadań komunikacyjnych odbywa się wg zasady RM. Najwyższy priorytet otrzymują zadania o najkrótszym okresie występowania. W przypadku równych okresów występowania o nadaniu priorytetu decyduje nr porządkowy węzła. Na rys. 7.2 przedstawiono okres występowania zadań w funkcji priorytetu.



Rys. 7.2. Okres występowania zadania w funkcji priorytetu zadania

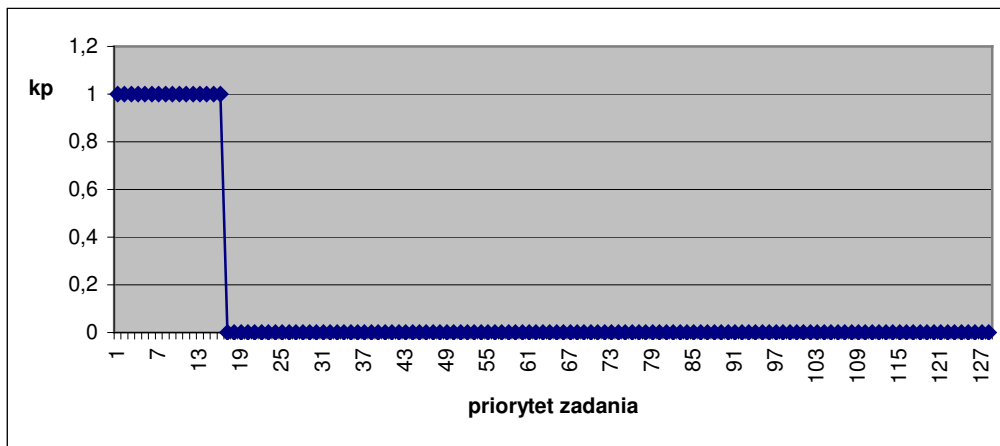
W kolejnych symulacjach liczba zadań komunikacyjnych realizowanych w systemie jest zwiększana o 16. W symulacji nr 1 liczba realizowanych zadań komunikacyjnych wynosi 16 natomiast w symulacji nr 8 liczba ta wynosi 128. Wartość współczynnika wykorzystania magistrali w kolejnych symulacjach przedstawiono na rys. 7.3.



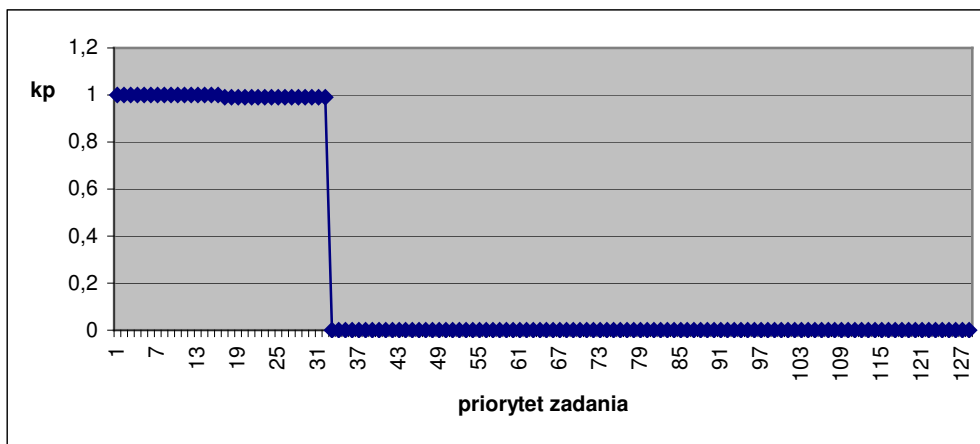
Rys. 7.3. Stopień wykorzystania magistrali systemu w kolejnych symulacjach

Wyniki badań symulacyjnych

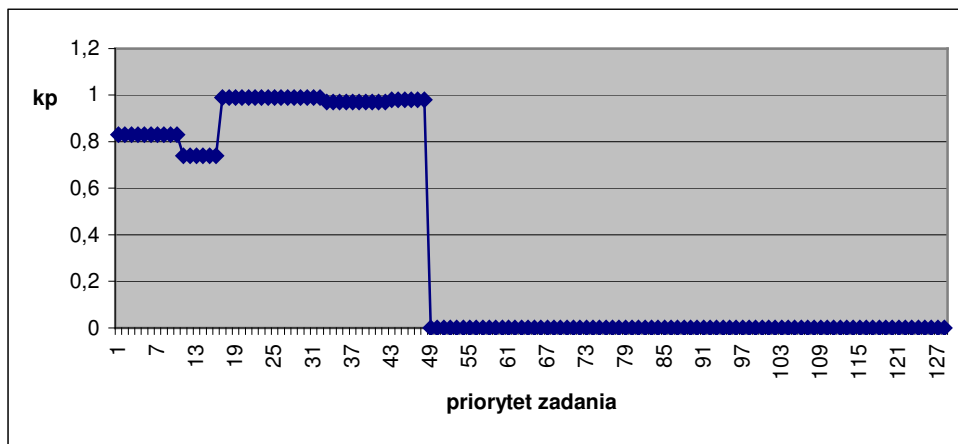
Wybrane wyniki badań symulacyjnych przedstawiono na rysunkach od 7.4 do 7.11. Na rysunkach przedstawiono współczynniki przejścia k_p dla zadań w kolejnych symulacjach.



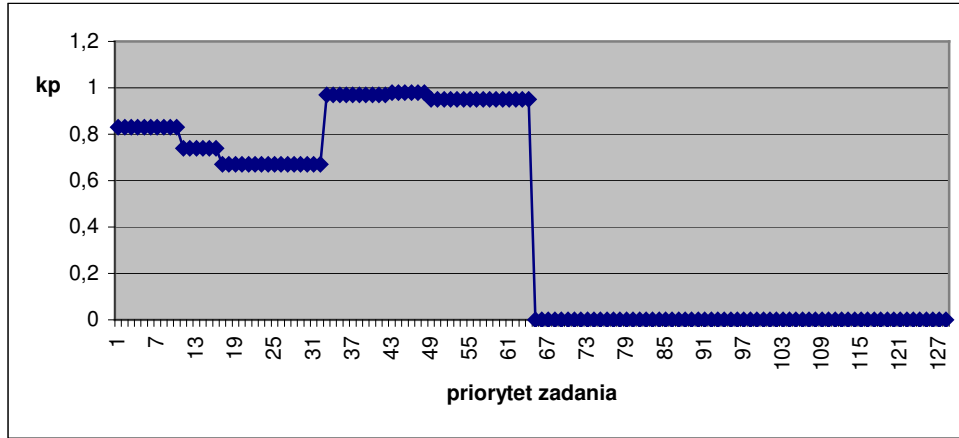
Rys. 7.4. Współczynniki przejścia k_p dla zadań w symulacji nr 1



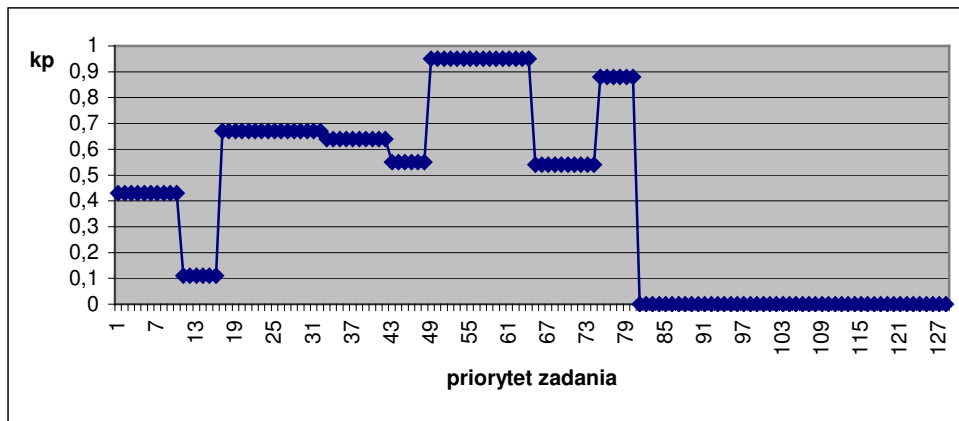
Rys. 7.5. Współczynniki przejścia k_p dla zadań w symulacji nr 2



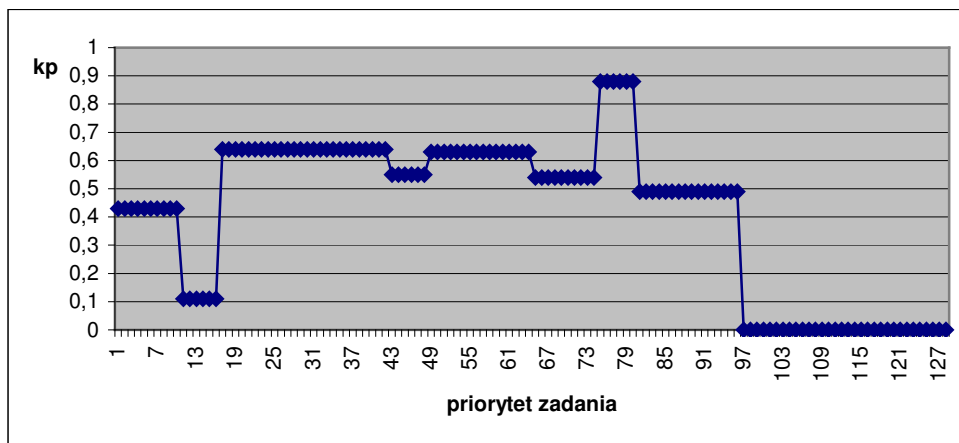
Rys. 7.6. Współczynniki przejścia k_p dla zadań w symulacji nr 3



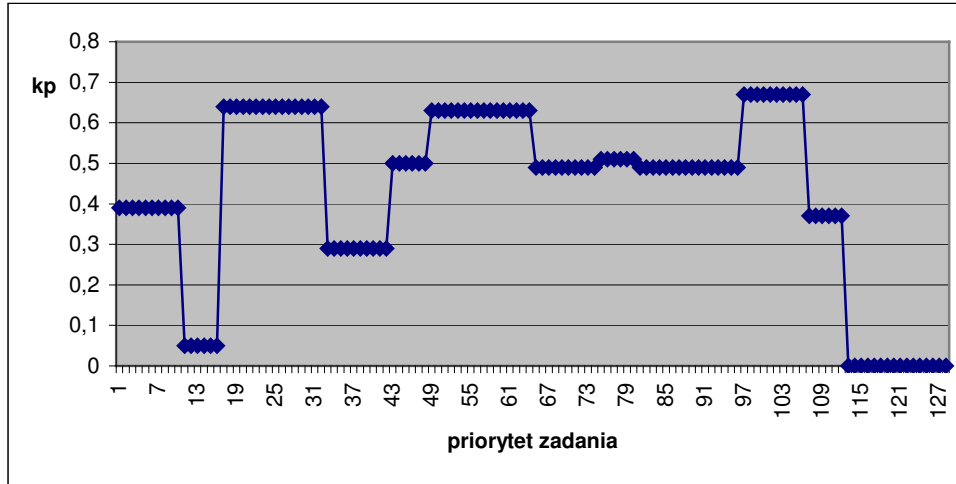
Rys. 7.7. Współczynniki przejścia k_p dla zadań w symulacji nr 4



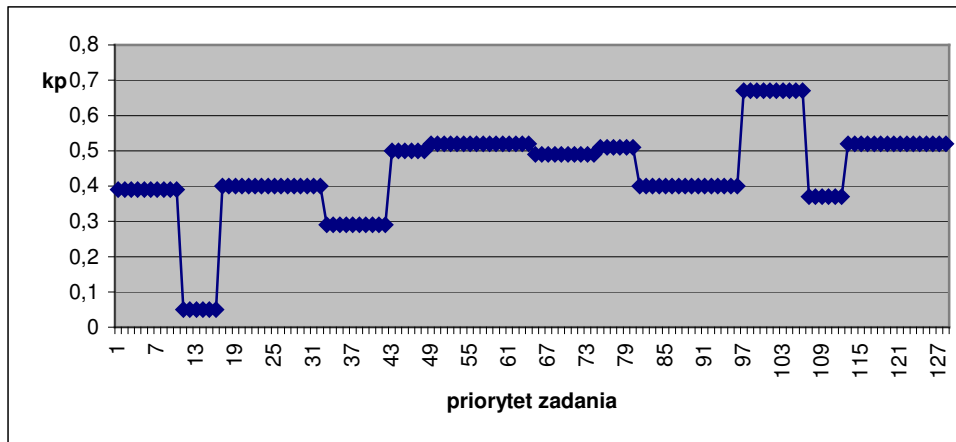
Rys. 7.8. Współczynniki przejścia k_p dla zadań w symulacji nr 5



Rys. 7.9. Współczynniki przejścia k_p dla zadań w symulacji nr 6



Rys. 7.10. Współczynniki przejścia k_p dla zadań w symulacji nr 7



Rys. 7.11. Współczynniki przejścia k_p dla zadań w symulacji nr 8

W symulacjach nr 1 i 2 osiągnięto wartość współczynnika przejścia $k_p = 1$ (grupa zadań A i B). W kolejnej symulacji zwiększanie liczby zadań systemu o grupę C powoduje obniżenie współczynnika przejścia dla zadań grupy A. Podobnie po dołączeniu zadań grupy D ulega obniżeniu współczynnik przejścia dla zadań należących do grupy B. Dalsze zwiększanie liczby zadań powoduje utratę danych w każdym zadaniu (rys. 7.8 do 7.11).

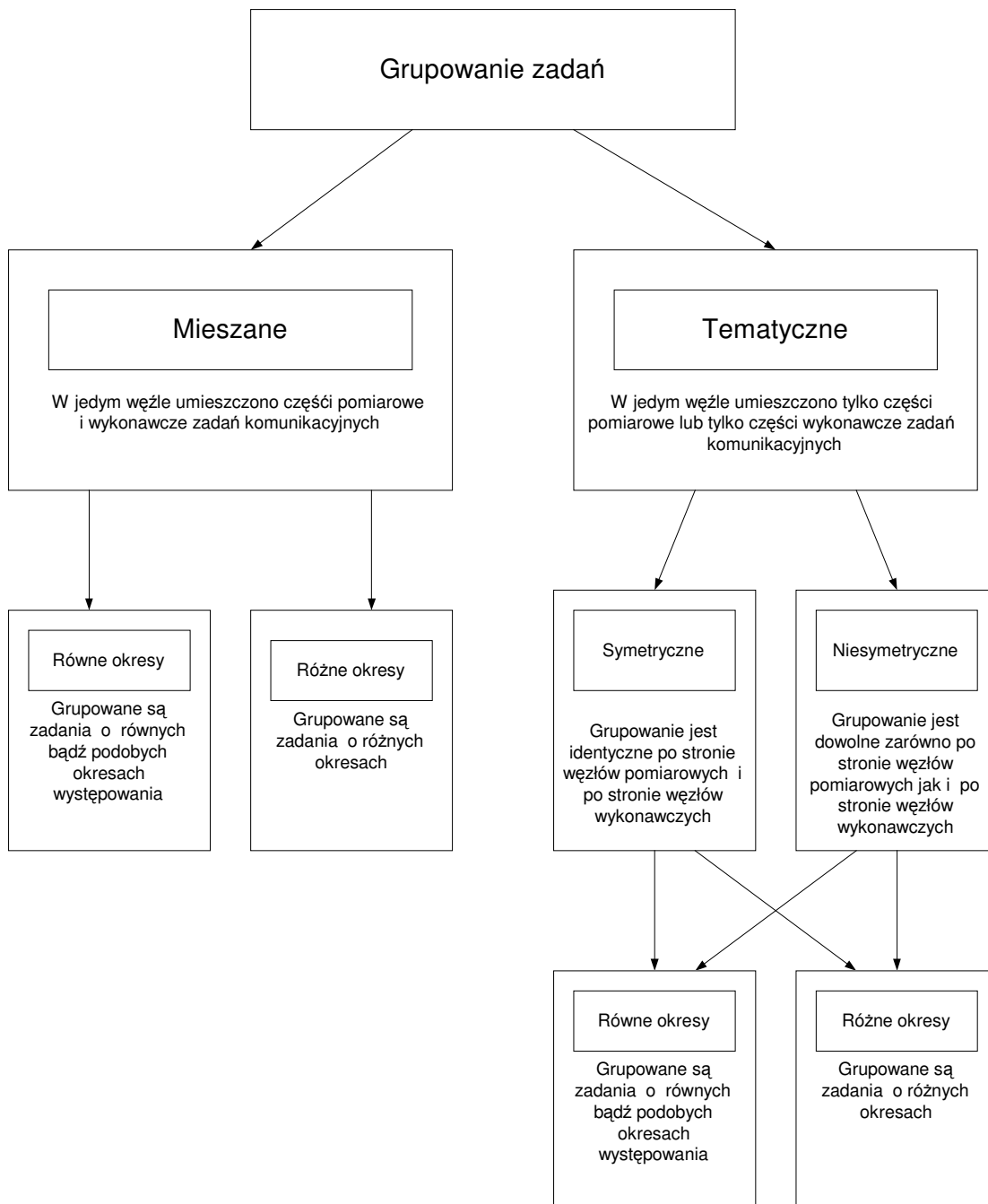
Analiza wyników symulacji, przeprowadzona na podstawie uzyskanych wartości liczb nadpisań w buforze nadawczym oraz liczb napisań w buforze odbiorczym wskazuje, że utrata danych następuje w węzłach wykonawczych. Nie odczytane dane przeznaczone dla zadań o dłuższym okresie występowania blokują odczyt danych przeznaczonych dla zadań o krótszym okresie występowania. W efekcie bufor się wypełnia i część wpisów od strony magistrali komunikacyjnej jest nadpisywana.

7.2.2. Wpływ struktury systemu i struktury węzła na właściwości rozproszonego systemu pomiarowo - sterującego

Celem prowadzenia badań symulacyjnych było określenie wpływu struktury RSPS i struktury węzła, przy stałej liczbie zadań realizowanych w systemie, na utratę danych oraz wskazanie, w którym miejscu systemu utrata danych następuje. Badano również wpływ na czas opóźnień w transmisji danych. Parametrem charakteryzującym utratę danych są współczynniki przejścia zadania (k_p) i przejścia systemu (k_s), określone zależnościami (5.1) i

(5.3). Wartość współczynnika $k_s=1$ oznacza, że wszystkie dane pozyskane przez część pomiarową wszystkich zadań systemu zostały wykorzystane do sterowania przez część wykonawczą zadań systemu. Wartość współczynnika przejścia systemu $k_s < 1$ oznacza, że nastąpiła utrata części danych.

W prowadzonych badaniach symulacyjnych zmiana struktury RSPS wiązała się ze zmianą liczby węzłów. Przy założeniu, że liczba zadań realizowanych przez RSPS jest stała, należy w każdej przeprowadzonej symulacji rozstrzygnąć, w których węzłach systemu nastąpi realizacja zadań będących częścią pomiarową i częścią wykonawczą zadań systemu. W tym celu przedstawiono na rys. 7.12 propozycję klasyfikacji grupowania zadań w RSPS.



Rys. 7.12. Klasyfikacja grupowania zadań w RSPS

Zaproponowany podstawowy podział grupowania zadań wynika z tego, czy w poszczególnych węzłach będą umieszczane tylko części pomiarowe (ewentualnie części wykonawcze) zadań systemu lub też zarówno części pomiarowe i wykonawcze zadań systemu. W pierwszym przypadku możemy mówić o grupowaniu tematycznym, w efekcie którego powstają węzły pomiarowe i wykonawcze. Natomiast w drugim przypadku otrzymujemy grupowanie mieszane. Na tym etapie grupowania zadań rozstrzygamy o konieczności zastosowania w węzłach buforów komunikacyjnych nadawczych lub odbiorczych, ewentualnie jednych i drugich. Szczególnym przypadkiem grupowania tematycznego może być grupowanie symetryczne, to znaczy takie, w którym zarówno węzły pomiarowe i wykonawcze realizują zadania pomiarowe lub wykonawcze identycznych zadań systemu.

Zarówno w grupowaniu tematycznym jak i grupowaniu mieszanym można zrealizować grupowanie uwzględniające nie tylko typ wykonywanego zadania, ale także okres ich występowania. W pojedynczym węźle można umieszczać zadania o równych bądź zbliżonych okresach występowania lub o różnych okresach występowania.

Parametryzacja modelu systemu

Badania, określające wpływ struktury RSPS i struktury węzła na jego właściwości, przeprowadzono przy następujących podstawowych założeniach:

- liczba zadań realizowanych w systemie: 16,
- metoda szeregowania zadań w węzłach: RM bez wyłączenia,
- metoda dostępu do medium transmisyjnego: *peer to peer*,
- liczba przesyłanych bitów danych w każdym zadaniu komunikacyjnym: 16,
- współczynnik wykorzystania magistrali u_m : 0,5 lub 1,0,
- czas symulacji: 10 mln cykli zegara taktującego model.

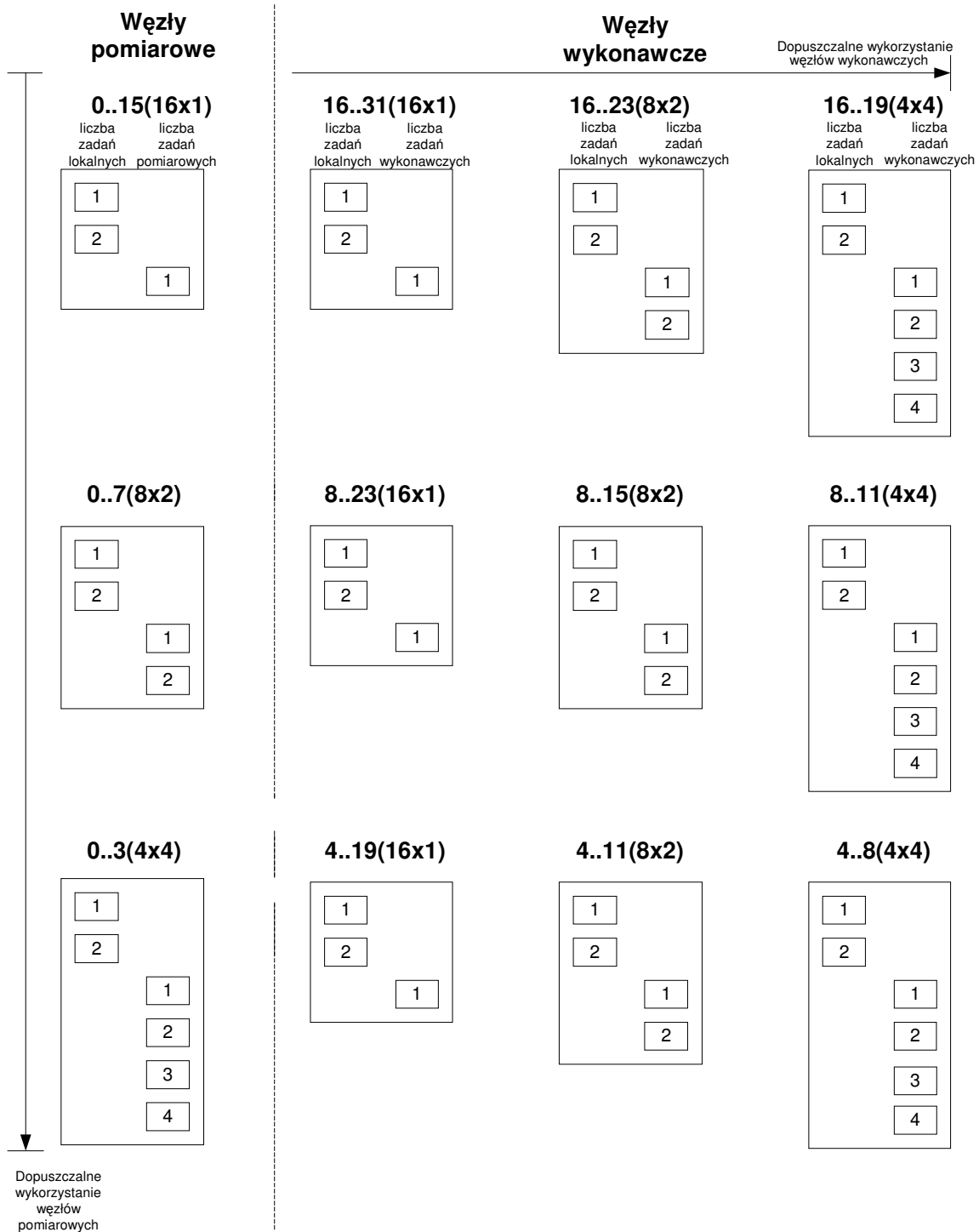
Jak już wspomniano istnieje wiele możliwych struktur RSPS. Zazwyczaj podczas projektowania struktura systemu jest narzucana przez specyfikę kontrolowanego bądź sterowanego obiektu. Na rys. 7.13 przedstawiono możliwe do zastosowania struktury systemu przy stosowaniu grupowania tematycznego dla szesnastu zadań systemu. Dla każdego z trzech przypadków grupowania zadań w węzłach pomiarowych przewidziano 3 przypadki grupowania węzłów wykonawczych. Na rysunku założono, że każdy z węzłów realizuje dodatkowo dwa zadania lokalne. I tak dla przypadku pierwszego, w którym wyróżniono 16 węzłów pomiarowych (każdy realizuje 1 zadanie pomiarowe) przewidziano 3 przypadki grupowania zadań wykonawczych w postaci:

- 16 węzłów wykonawczych (każdy węzeł realizuje 1 zadanie wykonawcze),
- 8 węzłów wykonawczych (każdy węzeł realizuje 2 zadania wykonawcze),
- 4 węzły wykonawczych (każdy węzeł realizuje 4 zadania wykonawcze).

Ograniczenia w grupowaniu zadań to przede wszystkim ograniczenia wynikające z umiejscowienia przetworników pomiarowych i urządzeń wykonawczych względem procesu czy też obiektu oraz ograniczenia związane z wykorzystaniem mikroprocesorów w węzłach. Wartość współczynnika wykorzystania mikroprocesora w węzłach systemu powinna gwarantować wykonanie szeregowania wszystkich zadań w węźle systemu.

Jeżeli strategia przydzielania priorytetów do zadań systemu, czyli właściwie dla zadań komunikacyjnych, jest typu RM to grupowanie zadań o równych okresach jest równoznaczne z grupowaniem zadań o sąsiadujących priorytetach. Taki sposób grupowania zadań został w pracy nazwany jako „sp”. Grupowanie zadań o różnych okresach może polegać na tworzeniu par zadań o priorytetach przesuniętych względem siebie o liczbę równą liczbie węzłów

pomiarowych czy też wykonawczych. Taki sposób grupowania zadań został oznaczony jako „pp”.



Rys. 7.13. Grupowanie tematyczne dla 16 zadań komunikacyjnych

W badaniach symulacyjnych brano pod uwagę system, w którym należy zrealizować 16 zadań o parametrach przedstawionych w tabeli 7.4. Każde zadanie systemu zawiera część pomiarową w postaci zadania realizowanego przez jeden z węzłów oraz część wykonawczą również realizowaną przez jeden z węzłów systemu. Wartości parametrów C i T są wyrażone

w liczbie cykli zegara taktującego model symulacyjny. Realizacja pojedynczego zadania systemu jest związana z realizacją zadania komunikacyjnego, czyli z przesłaniem danych przez magistralę systemu.

Tab. 7.4. Parametry zadań realizowanych w systemie

Nr zadania (priorytet)	Część pomiarowa		Część wykonawcza	
	T	C	T	C
1..4 (0..3)	1110	130	1110	130
5..8 (4..7)	2110	240	2110	240
9..12 (8..11)	3110	330	3110	330
13..16(12..15)	4110	410	4110	410

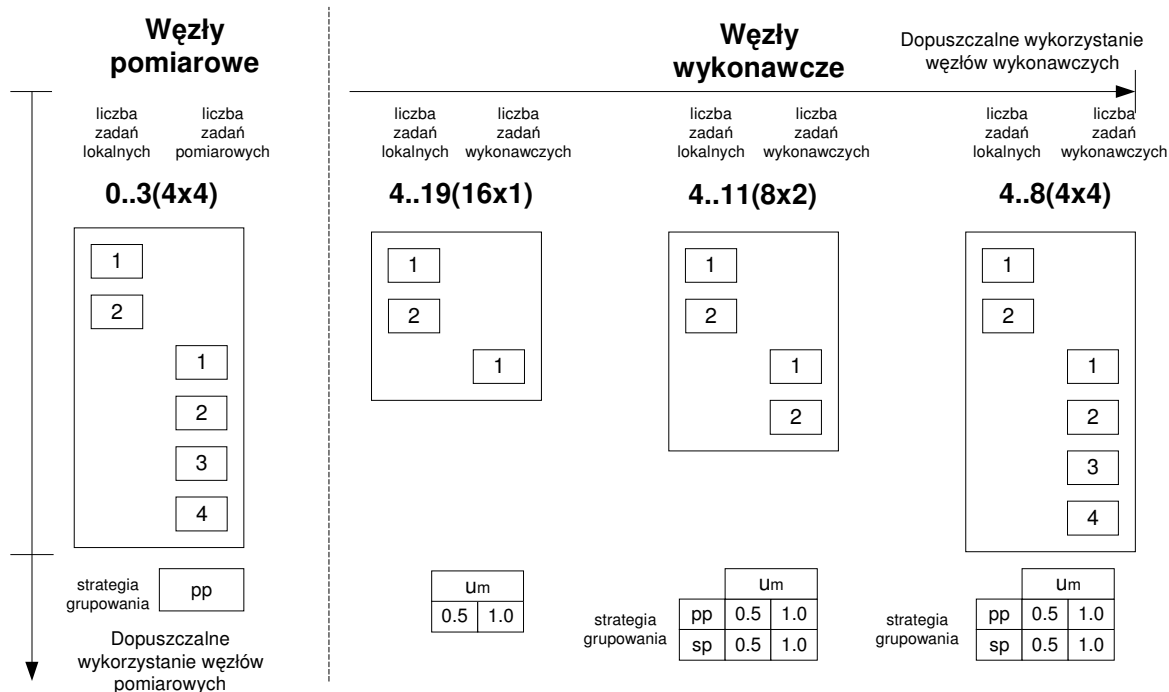
Założono, że części pomiarowe zadań systemu są zgrupowane w czterech węzłach wg strategii „pp”. Części wykonawcze zadań systemu w kolejnych symulacjach grupowane są wg schematu przedstawionego w tabeli 7.5. Przy takim obciążeniu poszczególnych węzłów można mówić o węzłach pomiarowych, zawierających części pomiarowe zadań systemu, oraz o węzłach wykonawczych zawierających części wykonawcze zadań systemu. Każdy z węzłów jest obciążony dodatkowo przez dwa zadania lokalne. Każdy przypadek obciążenia węzła wykonawczego jest badany dla dwóch szybkości transmisji danych na magistrali. Współczynnik wykorzystania magistrali u_m wynosi wtedy 1,0 lub 0,5.

Tab. 7.5. Schemat grupowania zadań wykonawczych w kolejnych symulacjach

Nr symulacji	Liczba węzłów wyk.	Liczba zadań w węzle wyk.	Strategia grupowania zadań	u_m
1	16	1		0,5
2	16	1		1
3	8	2	pp	0,5
4	8	2	pp	1
5	4	4	pp	0,5
6	4	4	pp	1
7	8	2	sp	0,5
8	8	2	sp	1
9	4	4	sp	0,5
10	4	4	sp	1
11	4	4	pp	0,5
12	4	4	pp	1

Grupowanie zadań w poszczególnych węzłach pomiarowych i wykonawczych odbywało się wg strategii „pp” lub według strategii „sp”. W przypadku grupowania zadań dla czterech węzłów wg strategii „pp” w pierwszym węzle umieszczono zadania o priorytetach: 0, 4, 8, 12. W przypadku grupowania zadań dla czterech węzłów wg strategii „sp” w pierwszym węzle zostały umieszczone zadania o priorytetach: 0, 1, 2, 3.

Na rys. 7.14 przedstawiono rozpatrywane podczas symulacji struktury systemu.



Rys.7.14. Rozpatrywane struktury systemu

Na potrzeby wykonania badań symulacyjnych przyjęto, że obciążenie poszczególnych węzłów pomiarowych (2 zadania lokalne, 4 zadania pomiarowe) jest identyczne i jest przedstawione w tabeli 7.6.

Tab. 7.6. Obciążenie węzłów pomiarowych

Nr zadania	Typ zadania	T	C	C/T
1	zad. Lokalne	500	50	0,1
2	zad. Lokalne	700	70	0,1
3	zad. pomiarowe	1110	130	0,117
4	zad. pomiarowe	2110	240	0,113
5	zad. pomiarowe	3110	330	0,106
6	zad. pomiarowe	4110	410	0,099
U_w				0,636

W tabeli 7.7 przedstawiono obciążenie kolejnych węzłów pomiarowych zadaniami, które są częściami pomiarowymi zadań systemu. W nawiasie podano priorytet danego zadania systemu.

Tab. 7.7 Obciążenie węzłów pomiarowych.

Nr zadania	Nr węzła pomiarowego			
	0	1	2	3
	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)
3	1110(0)	1110(1)	1110(2)	1110(3)
4	2110(4)	2110(5)	2110(6)	2110(7)
5	3110(8)	3110(9)	3110(10)	3110(11)
6	4110(12)	4110(13)	4110(14)	4110(15)

W przypadku zastosowania strategii „pp” grupowania zadań, będących częściami wykonawczymi zadań systemu, obciążenie węzłów wykonawczych dla struktury z 4 węzłami wykonawczymi przedstawiono w tabeli 7.8, a dla struktury z 8 węzłami wykonawczymi w tabeli 7.9.

Tab. 7.8. Obciążenie węzłów wykonawczych w symulacji nr 5 i 6

Nr zadania	Nr węzła wykonawczego			
	4	5	6	7
	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)
3	1110(0)	1110(1)	1110(2)	1110(3)
4	2110(4)	2110(5)	2110(6)	2110(7)
5	3110(8)	3110(9)	3110(10)	3110(11)
6	4110(12)	4110(13)	4110(14)	4110(15)

Tab. 7.9. Obciążenie węzłów wykonawczych w symulacji nr 3 i 4

Nr zadania	Nr węzła wykonawczego							
	4	5	6	7	8	9	10	11
	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)
3	1110(0)	1110(1)	1110(2)	1110(3)	2110(4)	2110(5)	2110(6)	2110(7)
4	3110(8)	3110(9)	3110(10)	3110(11)	4110(12)	4110(13)	4110(14)	4110(15)

W przypadku zastosowania strategii „sp” grupowania zadań, które są częściami wykonawczymi zadań systemu, obciążenie węzłów wykonawczych dla struktury z 4 węzłami wykonawczymi przedstawiono w tabeli 7.10, a dla struktury z 8 węzłami wykonawczymi w tabeli 7.11. W tabeli 7.9 do 7.11 podano w nawiasach priorytety zadania systemu.

Tab.7.10. Obciążenie węzłów wykonawczych w symulacji nr 9 i 10

Nr zadania	Nr węzła wykonawczego			
	4	5	6	7
	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)
3	1110(0)	2110(4)	3110(8)	4110(12)
4	1110(1)	2110(5)	3110(9)	4110(13)
5	1110(2)	2110(6)	3110(10)	4110(14)
6	1110(3)	2110(7)	3110(11)	4110(15)

Tab. 7.11. Obciążenie węzłów wykonawczych w symulacji nr 7 i 8

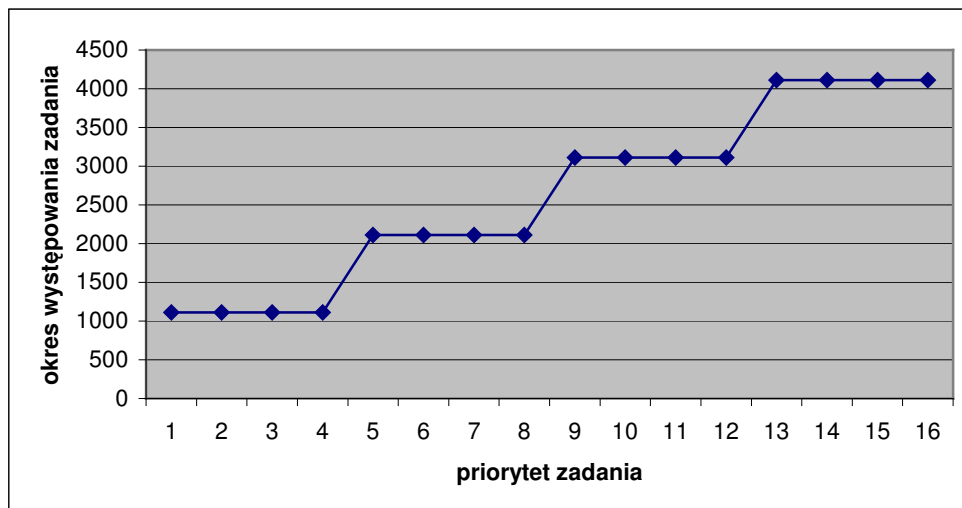
Nr zadania	Nr węzła wykonawczego							
	4	5	6	7	8	9	10	11
	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)	T[ms] (priorytet)
3	1110(0)	1110(2)	2110(4)	2110(6)	3110(8)	3110(10)	4110(12)	4110(14)
4	1110(1)	1110(3)	2110(5)	2110(7)	3110(9)	3110(11)	4110(13)	4110(15)

Z realizacją każdego zadania systemu łączy się również realizacja zadania komunikacyjnego. Parametry zadań komunikacyjnych przedstawiono w tabeli nr 7.12. Okres występowania zadania komunikacyjnego jest równy okresowi występowania zadania pomiarowego przynależnego do tego samego zadania systemu. Czas realizacji C zadania komunikacyjnego zależy od przyjętej metody dostępu do magistrali komunikacyjnej i ilości danych do przesłania w ramach każdego zadania komunikacyjnego. W przeprowadzanych symulacjach przyjęto metodę dostępu do nośnika *peer to peer* oraz przyjęto, że w ramach każdego zadania komunikacyjnego jest przesyłanych 16 bitów danych. W konsekwencji czas realizacji każdego zadania jest stały i wynosi 64 lub 128 cykli zegara taktującego model. Odpowiednio do tych wartości otrzymuje się współczynnik wykorzystania magistrali $u_m = 0,5$ lub $u_m = 1,0$.

Tab. 7.12. Parametry zadań komunikacyjnych.

Liczba zadań	Priorytet zadań	Liczba bitów do przesłania	T	C	C/T dla zadania	C/T dla wszystkich zadań	C	C/T dla zadania	C/T dla wszystkich zadań
4	0..3	16	1110	64	0,058	0,231	128	0,115	0,461
4	4..7	16	2110	64	0,030	0,121	128	0,061	0,243
4	8..11	16	3110	64	0,021	0,082	128	0,041	0,165
4	12..15	16	4110	64	0,016	0,062	128	0,031	0,125
u_m						0,497	u_m		0,993

Przydział priorytetów do zadań komunikacyjnych odbywa się wg zasady RM. Najwyższy priorytet otrzymują zadania o najkrótszym okresie występowania. W przypadku równych okresów występowania o nadaniu priorytetu decyduje nr porządkowy węzła. Na rys. 7.15 przedstawiono okres występowania zadań w funkcji priorytetu zadania.

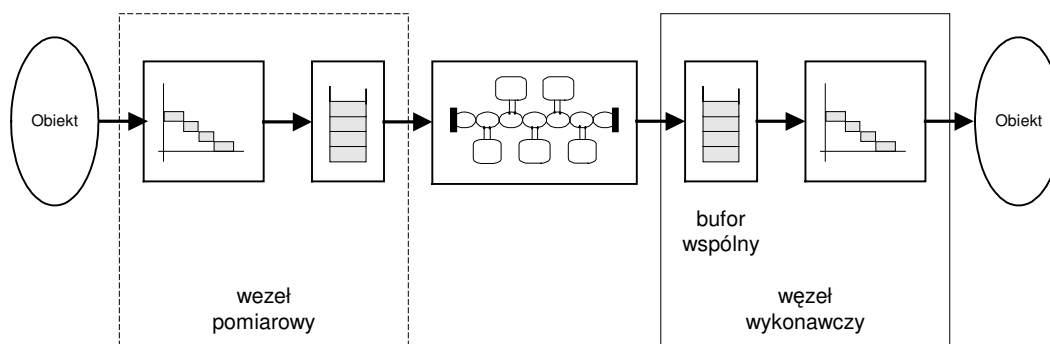


Rys.7.15. Okres występowania zadania w funkcji priorytetu zadania

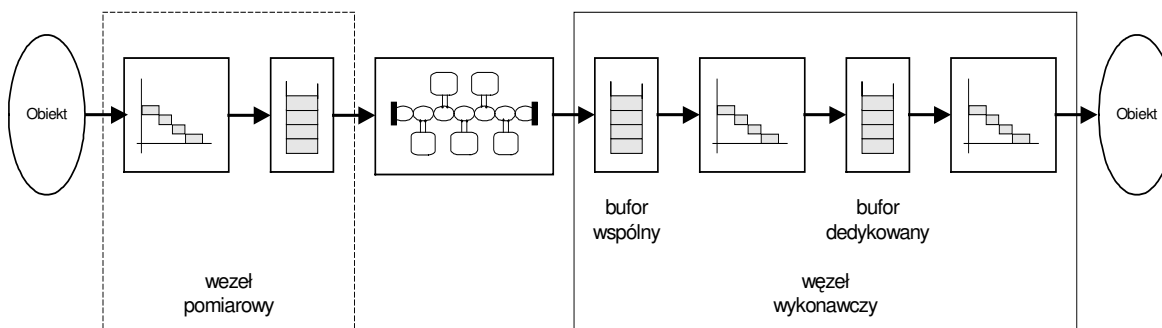
Wyniki badań symulacyjnych

Prezentowane poniżej wybrane wyniki badań symulacyjnych, oznaczone numerami porządkowymi od 1 do 10, zostały przeprowadzone dla takiej struktury węzła wykonawczego, w której wszystkie zadania wykonawcze odczytują dane z tego samego bufora odbiorczego, obsługiwanego wg zasady FIFO. Model symulacyjny dla pojedynczego zadania systemu z wspólnym buforem komunikacyjnym w węźle pomiarowym i wykonawczym przedstawiono na rys. 7.16.

W symulacjach oznaczonych numerami 11 i 12 wprowadzono zmianę, która polega na tym, że w strukturze węzła jedno z realizowanych w nim zadań lokalnych cyklicznie odczytuje dane ze wspólnego bufora FIFO i umieszcza te dane w buforze dedykowanym dla danego zadania wykonawczego. W efekcie dane pomiarowe w stosunku do rozwiązania podstawowego poddawane są dodatkowym działaniom w dwóch blokach modelu tzn. w współużytkowanym procesorze węzła, który realizuje lokalne zadanie związane z przeniesieniem danych oraz w buforze dedykowanym. Na rys. 7.17 przedstawiono model symulacyjny dla pojedynczego zadania systemu z buforem dedykowanym po stronie wykonawczej.



Rys. 7.16. Model symulacyjny dla pojedynczego zadania w systemie *peer to peer* z buforem wspólnym po stronie wykonawczej



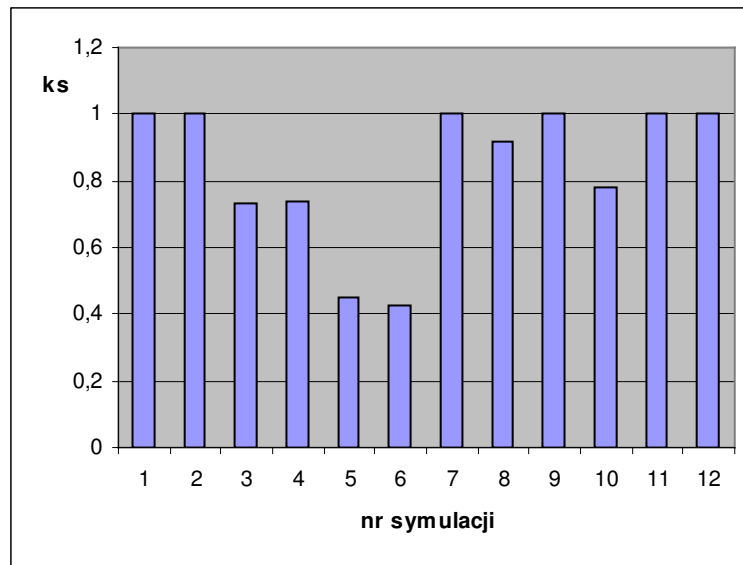
Rys. 7.17. Model symulacyjny dla pojedynczego zadania w systemie *peer to peer* z buforem dedykowanym po stronie wykonawczej.

Wartości współczynnika przejścia dla poszczególnych zadań systemu w kolejnych symulacjach przedstawiono w tabeli nr 7.13.

Tab. 7.13. Współczynnik przejścia zadania systemu w kolejnych symulacjach

Nr zadania	Nr symulacji											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Liczba węzłów wykonawczych i strategia grupowania											
	16	16	8pp	8pp	4pp	4pp	8sp	8sp	4sp	4sp	4pp	4pp
	Współczynnik wykorzystania magistrali u_m											
	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1
0	1	1	0,57	0,49	0,45	0,03	1	1	1	0,87	1	1
1	1	1	0,64	0,52	0,45	0,16	1	1	1	0,7	1	1
2	1	1	0,57	0,55	0	0,2	1	0,91	1	0,5	1	1
3	1	1	0,53	0,59	0,03	0,21	1	0,52	1	0,34	1	1
4	1	1	0,53	0,57	0,57	0,24	1	1	1	0,96	1	1
5	1	1	0,56	0,61	0,57	0,24	1	1	1	0,68	1	1
6	1	1	0,61	0,61	0,5	0,3	1	0,99	1	0,57	1	1
7	1	1	0,59	0,64	0,03	0,29	1	0,49	1	0,42	1	1
8	1	1	0,85	0,95	0,42	0,63	1	1	1	1	1	1
9	1	1	0,8	0,91	0,42	0,52	1	1	1	0,82	1	1
10	1	1	0,9	0,89	0,48	0,49	1	1	1	0,83	1	1
11	1	1	0,92	0,9	0,55	0,49	1	0,82	1	0,79	1	1
12	1	1	0,89	0,93	0,56	0,73	1	1	1	1	1	1
13	1	1	0,92	0,87	0,56	0,75	1	1	1	1	1	1
14	1	1	0,9	0,83	0,64	0,75	1	1	1	1	1	1
15	1	1	0,9	0,93	0,97	0,76	1	1	1	1	1	1

Na rys. 7.18 przedstawiono wartości współczynnika przejścia systemu w kolejnych symulacjach, które umożliwiają ocenę jakościową systemu dla jego zadanej struktury.



Rys. 7.18. Wartość współczynnika przejścia systemu

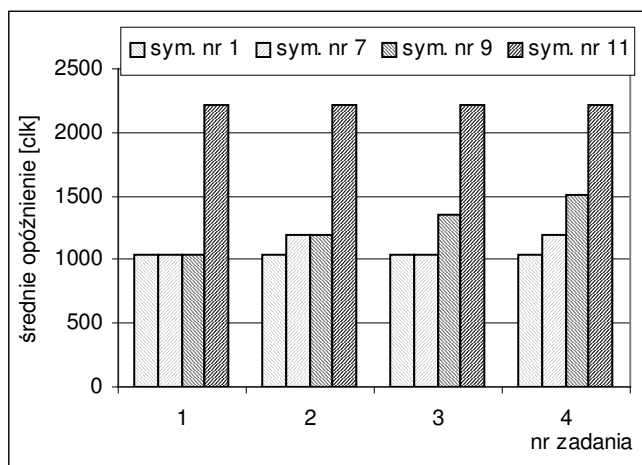
Dla struktur RSPS określonych symulacjami 1, 2, 7, 9, 11, 12 otrzymano współczynnik $k_s=1$. Oznacza to, że wszystkie dane pozyskane przez część pomiarową wszystkich zadań systemu zostały wykorzystane do sterowania przez część wykonawczą zadań systemu. W

pozostałych analizowanych strukturach nastąpiła utrata części danych. Informację dotyczącą stopnia utraty danych w poszczególnych zadaniach dla określonych struktur systemu zawiera współczynnik przejścia zadania systemu k_p (tab. 7.13).

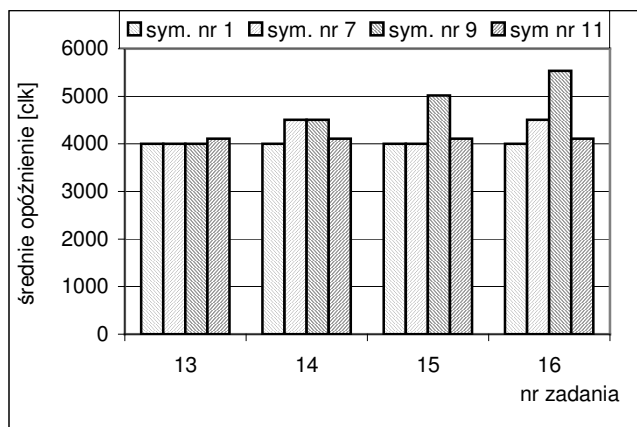
Analiza wyników symulacji, przeprowadzona na podstawie uzyskanych wartości liczb nadpisań w buforze nadawczym oraz liczb napisania w buforze odbiorczym wskazuje, że utrata danych następuje w węzłach wykonawczych. Nieodczytane dane przeznaczone dla zadań o dłuższym okresie występowania blokują odczyt danych przeznaczonych dla zadań o krótszym okresie występowania. W efekcie bufor się wypełnia i część wpisów od strony magistrali komunikacyjnej jest nadpisywana.

Przy strukturze węzła ze wspólnym buforem odbiorczym dla symulacji nr 5 i nr 6 osiągnięto stosunkowo najgorsze wartości współczynnika k_s . Są to przypadki, w których w węzłach wykonawczych zastosowano identyczne grupowanie zadań jak w węzłach pomiarowych. Czyli zarówno w węzłach pomiarowych jak i w węzłach wykonawczych bufony komunikacyjne, nadawcze i odpowiednio odbiorcze, są wykorzystywane przez cztery zadania.

Symulację dla przypadku nr 5 i nr 6 powtórzono dla zmienionej struktury węzła wykonawczego. Zmiana struktury polegała zastosowaniu bufora dedykowanego (rys. 7.17). W wyniku ponownych badań uzyskano współczynnik przejścia systemu $k_s = 1$ (symulacje nr 11 i 12).



Rys. 7.19. Średnie opóźnienia w transmisji danych dla symulacji: 1, 7, 9, 11, dla zadań systemu o najkrótszym okresie występowania



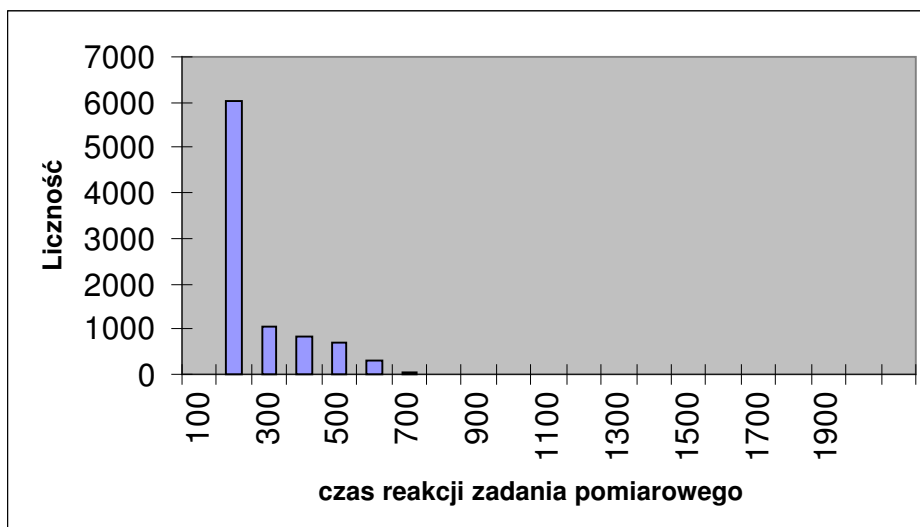
Rys. 7.20. Średnie opóźnienia w transmisji danych dla symulacji: 1, 7, 9, 11, dla zadań systemu o najdłuższym okresie występowania

Zmiana struktury węzła, która wpływa na poprawienie wartości współczynnika przejścia zadania systemu i współczynnika przejścia systemu wpływa także na wartość opóźnienia w transmisji danych w systemie. W systemie były realizowane cztery grupy zadań. W każdej grupie zadań występowały zadania o identycznych parametrach czasowych.

Na rys. 7.19 i 7.20 przedstawiono średnie czasy opóźnień w transmisji danych dla zadań z grupy o najmniejszym i największym okresie występowania. Dla wszystkich wymienionych przypadków współczynnik wykorzystania magistrali wynosił $u_m=0,5$ natomiast współczynnik przejścia systemu $k_s=1$. W kolejnych realizacjach zadania był wyznaczany odstęp czasu od momentu wpisania danych do bufora nadawczego węzła pomiarowego do momentu odczytu danych z bufora odbiorczego węzła wykonawczego lub bufora dedykowanego. Wpisanie danych do bufora nadawczego odbywało się w końcowej fazie realizacji zadania pomiarowego. Odczyt danych z bufora odbiorczego następował także w fazie końcowej realizacji zadania wykonawczego.

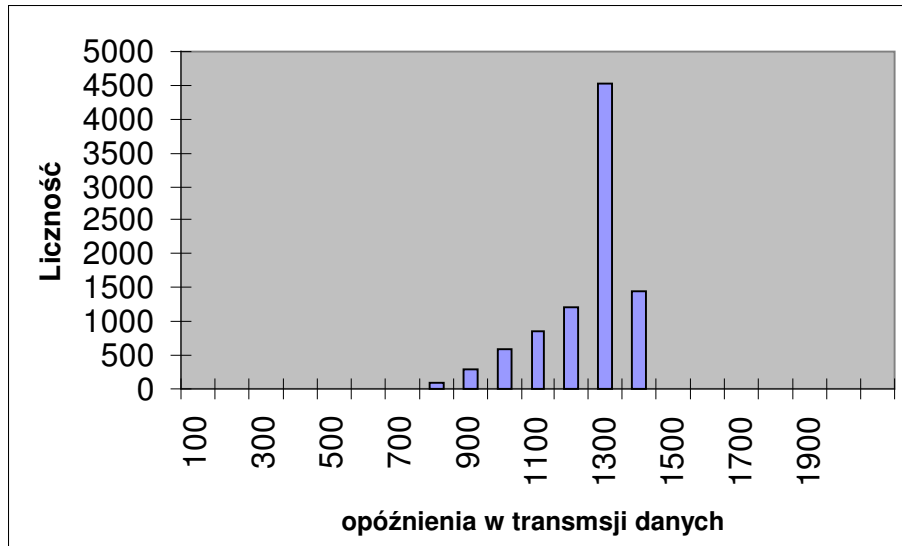
Zastosowanie mechanizmu buforów dedykowanych wiąże się ze wzrostem średniego opóźnienia w transmisji danych w systemie. Największy wpływ zastosowania buforów dedykowanych na opóźnienie występuje przy zadaniach o krótszym okresie występowania. Dla zadań o okresach większych ten wpływ jest znacznie mniejszy.

Zamieszczone poniżej histogramy opóźnień dotyczą zadania systemu nr 4 i zostały zarejestrowane w symulacji nr 7. Na rys. 7.21 przedstawiono histogram czasu reakcji zadania pomiarowego przynależnego do zadania systemu nr 4.



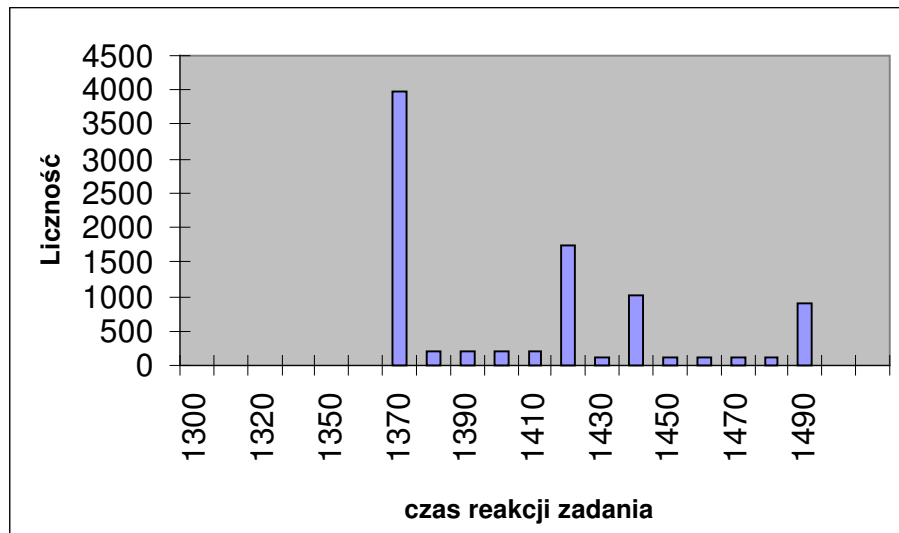
Rys. 7.21. Czas reakcji zadania pomiarowego zadania systemu nr 4

Na rys. 7.22 przedstawiono otrzymany histogram opóźnień w transmisji danych dla zadania systemu nr 4. W kolejnych realizacjach zadania był wyznaczany odstęp czasu od momentu wpisania danych do bufora nadawczego węzła pomiarowego do momentu odczytu danych z bufora odbiorczego węzła wykonawczego. Wpisanie danych do bufora nadawczego odbywało się w końcowej fazie realizacji zadania pomiarowego. Odczyt danych z bufora odbiorczego następował także w fazie końcowej realizacji zadania wykonawczego. Przy takim umiejscowieniu momentów zapisu i odczytu danych w buforach komunikacyjnych suma czasów reakcji zadania pomiarowego i zarejestrowanego opóźnienia w transmisji danych tworzą czas reakcji dla zadania systemu (sumowane czasy muszą pochodzić z tej samej realizacji zadania systemu).



Rys. 7.22. Opóźnienia w transmisji danych

Na rys. 7.23 przedstawiono histogram czasów reakcji zadania nr 4 wyznaczony jako czas który upływa od momentu wyzwolenia zadania pomiarowego do momentu zakończenia realizacji zadania wykonawczego. Zadanie pomiarowe i wykonawcze przynależą do tego samego zadania systemu.



Rys. 7.23. Histogram czasu reakcji zadania nr 4

Znajomość czasu reakcji poszczególnych zadań realizowanych w węzłach systemu oraz znajomość czasu reakcji zadań systemu, a w szczególności ich rozkładów, pozwala na ocenę systemu ze względu na warunki czasu rzeczywistego. Znajomość rozkładów czasów reakcji zadań systemu może być także przydatna w ocenie metrologicznej systemu.

7.3. Podsumowanie

W rozdziale tym, na przykładzie systemu pracującego w technologii *peer to peer*, przedstawiono wykorzystanie modelu symulacyjnego rozproszonego systemu pomiarowo –

sterującego do oceny poziomu utraty danych i opóźnień w transmisji danych w systemie. Badania podzielono na dwie części. W pierwszej części przy stałej liczbie węzłów w systemie i stałym obciążeniu poszczególnych węzłów systemu zmieniano liczbą realizowanych zadań systemu. W drugiej części, przy stałej liczbie zadań systemu zmieniano liczbę węzłów w systemie oraz strukturę węzłów wykonawczych. Przeprowadzone badania symulacyjne wskazują, że zastosowanie modeli symulacyjnych na etapie projektowania systemu może w znacznym stopniu pomóc podjąć decyzję o docelowej strukturze systemu. Znajomość stopnia utraty danych w systemie jest niezbędna do oceny poprawności funkcjonowania systemu. Natomiast znajomość opóźnień, a w szczególności ich rozkładów, pozwala na ocenę systemu ze względu na warunki czasu rzeczywistego oraz może być przydatna w ocenie metrologicznej systemu.

W badaniach zostały wykorzystane dwa opracowane modele symulacyjne. Część badań związanych z badaniem współczynnika przejścia zadań systemu została powtórzona dla modelu opartego o metodę przeglądania działań i metodę planowania zdarzeń. W obu przypadkach uzyskano identyczne wyniki. Model symulacyjny oparty o metodę planowania zdarzeń pozwala na uzyskanie wyników symulacji w krótszym czasie.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Na przestrzeni ostatniego trzydziestolecia jesteśmy świadkami ewolucji w zakresie struktury rozproszonych systemów pomiarowo – sterujących. Dostępność zaawansowanych rozwiązań dedykowanych układów elektronicznych do realizacji protokołów komunikacyjnych sieci przemysłowych utworzyła dogodne warunki do realizacji sieciowych systemów pomiarowo-sterujących. Ewolucja rozproszonych systemów pomiarowo - sterujących ze struktury multiplekserowej do struktury sieciowej stworzyła także zupełnie nową sytuację w ich projektowaniu. Jest to następstwo zmiany sposobu przesyłania informacji z stosowanej transmisji analogowej na cyfrową transmisję szeregową. Pojawiły się także inne nowe elementy, które wymagają uwzględnienia w procesie projektowania. Jest to budowa oprogramowania poszczególnych węzłów systemu zorientowana na wykorzystanie procesora przez różne podprogramy. Aktualnie do przeprowadzenia oceny dotrzymania ograniczeń czasowych w systemie nie wystarczy tylko znajomość parametrów komunikacyjnych i opracowanie analitycznych zależności wiążących wymagania stawiane projektowanym systemom z parametrami komunikacyjnymi danej sieci przemysłowej. W celu poprawnego oszacowania dotrzymania ograniczeń czasowych przez zadania we współczesnych rozproszonych systemach pomiarowo – sterujących należy na system spojrzeć jak na zespół współużytkowanych i równocześnie współpracujących ze sobą elementów. Także pod tym kątem należy przygotowywać narzędzia projektowe takich systemów.

Dotychczasowe metody analizy (analityczne i symulacyjne) umożliwiają fragmentaryczną ocenę właściwości systemów pomiarowo-sterujących. Metody analityczne znajdują zastosowanie tylko w najprostszych przypadkach, a niektóre z nich udzielają odpowiedzi w zakresie wartości minimalnych, średnich bądź maksymalnych interesujących nas parametrów czasowych. Ponadto stosowane do analizy takich systemów metody analityczne wskazują również, że do badania właściwości systemów pomiarowo-sterujących dużo korzystniejsze są metody symulacyjne.

W pracy postawiono tezę, która dotyczy możliwości wyznaczania wartości parametrów opisujących właściwości RSPS w oparciu o modele symulacyjne wykorzystujące metodę przeglądania działań oraz planowania zdarzeń. Prawdziwość tezy wykazano w rozdziale piątym, szóstym i siódmym pracy.

W rozdziale piątym stosując metody symulacji zadań dyskretnych (metoda przeglądania działań i metoda planowania zdarzeń) opracowano modele strukturalne RSPS, a na ich podstawie opracowano i wykonano modele symulacyjne. Wykorzystanie modeli symulacyjnych wymaga określenia wartości szeregu parametrów opisujących jego działanie. Rejestrowane podczas pracy programu realizującego model symulacyjny parametry umożliwiają określenie stopnia i miejsca utraty danych w systemie oraz umożliwiają określenie histogramów opóźnień dotyczących realizacji zadań cząstkowych składających się na zadania realizowane w systemie.

W rozdziale szóstym przeprowadzono ocenę poprawności działania modeli symulacyjnych, zarówno z wykorzystaniem modelu fizycznego jak i modelu analitycznego, co potwierdziło prawidłowość ich działania. Zastosowana metoda analityczna opiera się o teorię szeregowania zadań i polega na określeniu minimalnego i maksymalnego czasu odpowiedzi dla każdego współużytkowanego zasobu systemu biorącego udział w realizacji zadania systemu, a następnie sumowaniu tych czasów w celu otrzymania czasu odpowiedzi zadania. Zbudowany w celu oceny modeli symulacyjnych model fizyczny to stanowisko pomiarowe umożliwiające pomiar opóźnień transmisji danych w RSPS, składające się z czterech węzłów: węzła pomiarowego, węzła wykonawczego, węzła liczników oraz węzła generacji obciążenie magistrali. W skład stanowiska wchodzi także komputer klasy PC z oprogramowaniem do konfiguracji węzłów oraz rejestrowania wyników pomiarów opóźnień.

W celu wykazania przydatności opracowanych modeli symulacyjnych w projektowaniu RSPS wykonano badania z zastosowaniem opracowanych modeli symulacyjnych, które w pełni potwierdziły ich przydatność do wyznaczenia parametrów opisujących właściwości tych systemów. Wyniki badań przedstawiono w rozdziale 7. Uzyskano takie same wyniki badań symulacyjnych dla modelu opartego o metodę przeglądania działań i opartego o metodę planowania zdarzeń. Badania dotyczyły oceny wpływu liczby zadań systemu na poziom utraty danych w systemie. Przebadano 8 różnych przypadków zróżnicowanych pod względem liczby zadań realizowanych w systemie.

Badania dotyczyły także oceny wpływu struktury węzła i struktury systemu na wartość współczynnika przejścia systemu oraz na wartość opóźnienia w transmisji danych w systemie. Przebadano 10 różnych struktur systemu zróżnicowanych pod względem liczby węzłów wykonawczych oraz układu priorytetu zadań przeznaczonych do realizacji w tych węzłach. W ramach oceny wpływu struktury węzła na wartość współczynnika przejścia systemu uwzględniono strukturę węzła wykonawczego z wspólnym oraz dedykowanym buforem odbiorczym.

Zaproponowany w pracy współczynnik przejścia dla zadania systemu (k_p) i współczynnik przejścia systemu (k_s) umożliwiają lepszą ocenę właściwości RSPS, a szczególnie poprawność jego działania. Jest to bardzo istotne ze względu na potrzebę zwiększania liczby zadań realizowanych w węzle pomiarowym i wykonawczym. Opracowane metody symulacyjne pozwalają na podstawie współczynnika k_s ocenić jakość RSPS, a na podstawie współczynnika k_p wskazać, które z zadań systemu nie jest w pełni realizowane.

Ponadto dodatkowo zdefiniowana grupa parametrów umożliwia identyfikowanie przyczyn oraz miejsce utraty danych w systemie.

Przeprowadzone badania i analizy dotyczyły wybranej sieci przemysłowej, to jednak opracowane modele symulacyjne i uzyskane wyniki badań mogą być łatwo rozszerzone na inne sieci przemysłowe.

Informacja na temat poprawności systemu oraz histogramów opóźnień może być przydatna dla projektantów systemów w celu weryfikacji założeń projektowych jeszcze przed fazą wdrażania i uruchamiania RSPS.

Wykonane badania symulacyjne potwierdzają, że opracowane i wykonane modele symulacyjne, oparte o metodę przeglądania działań i metodę planowania zdarzeń, umożliwiają pełną ocenę właściwości RSPS, traktując system jako zespół współużytkowanych i równocześnie współpracujących ze sobą elementów.

Do najważniejszych osiągnięć pracy zaliczam:

- opracowanie modeli strukturalnych RSPS,
- opracowanie i wykonanie modeli symulacyjnych,
- zapewnienie elastyczności struktury modeli, która polega na określeniu zasad współpracy pomiędzy blokami modelu niezależnie od realizowanej metody szeregowania zadań, zbudowanie modelu fizycznego RSPS, umożliwiającego sprawdzenie poprawności działania wykonanych modeli symulacyjnych,
- zdefiniowanie współczynnika przejścia systemu i współczynnika przejścia zadania do oceny właściwości RSPS,
- zdefiniowanie parametrów, które umożliwiają identyfikowanie przyczyn utraty danych w systemie,
- wykazanie przydatności zaproponowanych modeli symulacyjnych do oceny wpływu struktury węzła i struktury systemu na właściwości RSPS.

Opracowane modele symulacyjne RSPS stanowią podstawę do prowadzenia dalszych prac naukowych. Do nich można zaliczyć:

- uwzględnienie wpływu zakłóceń na pracę RSPS i związanych z tym elementów powtarzania i potwierdzania przesłań danych,
- zastosowanie w węzłach systemu dynamicznych metod szeregowań zadań oraz metod z wyłuszczeniem,
- wprowadzenie elementów stochastycznych do modelu w postaci rozkładów prawdopodobieństwa czasów kolejnych zgłoszeń zadań i czasów ich obsługi.

9. LITERATURA

- [AudBurRicTinWel97] Audsley N., Burns A., Richardson M., Tindell K., Wellings A.: *Applying New Scheduling Theory to Static Priority Pre-emptive Scheduling*. Software Engineering Journal, 1997, Vol. 8, No. 5, pp. 285-292
- [Bar04] Barzykowski J. i inni : *Współczesna metrologia*. WNT, Warszawa 2004
- [Bin02] Biniak Z.: *Elementy teorii systemów modelowania i symulacji*. INFOPLAN, Warszawa 2002
- [BloBor94] Blome W., Borst W.: *Feldbus-Protokolle im Vergleich*. Elektronik 1/94, pp. 32 - 37
- [Boj05] Bojko T.: *Systemy sterowania współczesnych robotów przemysłowych*. PAK 11/2005, str. 13 – 16
- [Boj05b] Bojko T.: *Wireless sensors network for vibration measurement*. PAK 5/2005, str. 12 - 15
- [Cza99] Czachórski T.: *Modele kolejkowe systemów komputerowych*. Skrypty Uczelniane Politechnika Śląska, nr 2151, Gliwice 1999
- [Cza99b] Czachórski T.: *Modele kolejkowe w ocenie efektywności sieci i systemów komputerowych*. Pracownia Komputerowa Jacka Skalmierskiego, Gliwice 1999
- [DrwJak99] Drwal A., Jakubas W.: *Analiza wpływu zmian parametrów zadania na wartość wskaźników jakości w sieciach przemysłowych*. II Krajowa Konferencja Metody i systemy komputerowe w badaniu naukowym i projektowaniu inżynierskim, Kraków 1999, str. 9 - 14
- [Fil96] Filipowicz B.: *Modele stochastyczne w badaniach operacyjnych. Analiza i synteza systemów obsługi i sieci kolejkowych*. WNT, Warszawa 1996
- [Foj99] Fojcik M.: *Problemy integracji sieci przemysłowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Informatyka, z. 36, Gliwice 1999, str. 499 - 516
- [GajSzy98] Gajda J., Szyper M.: *Modelowanie i badania symulacyjne systemów pomiarowych*. Jartek s.c., Kraków 1998
- [Gaj01] Gajda J. B.: *Prognozowanie i symulacja a decyzje gospodarcze*. C.H.Beck, Warszawa 2001
- [Gaj01b] Gajer M.: *Zagadnienia przydziału i planowania zadań w systemach czasu rzeczywistego*. Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji, tom 47, z. 4, Kraków 2001, str. 433 – 461

- [Gaj01c] Gajer M.: *Wybrane zagadnienia analizy i projektowania rozproszonych systemów komputerowych czasu rzeczywistego*. Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji, tom 47, z. 4, Kraków 2001, str. 401 – 431
- [Gaj02] Gaj P.: *Dobór protokołów dla interfejsów komunikacyjnych urządzeń współpracujących z przemysłowymi systemami kontrolno – nadzorczymi*. Studia Informatica Politechnika Śląska, Vol. 23, No. 3, Gliwice 2002, str. 255 – 272
- [Gaj03] Gajer M.: *Podejście probabilistyczne do zagadnień szeregowania zadań w systemach czasu rzeczywistego*. Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji, tom 49, z.1, Kraków 2003, str. 33 – 45
- [Ham02] Hamid Al. Raimi: *Badanie błędów związanych z opóźnieniami w transmisji danych w systemach pomiarowych*. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2002
- [HasJai04] Hassan M., Jain R.: *Wysoko wydajne sieci TCP/IP*. Helion, Gliwice 2004
- [HayWróJacZygKwa02] Hayduk G., Wróbel G., Jachimski M., Zygmunt H., Kwasnowski P.: *Problemy aperiodycznego przesyłu dużych ilości danych na tle wymian periodycznych w sieci typu master – slave*. Studia Informatica Politechnika Śląska, Vol. 23, No. 3, Gliwice 2002, str. 195 – 205
- [HeyLicRat93] Heymann D., Lichtblau M., Rathmann S.: *Zeitverhaltensanalysen in CAN-Bussystemen*. Elektronik Plus 6/1993, pp. 7 - 14
- [Jak04] Jakubiec J.: *Błędy powodowane opóźnieniami w systemie pomiarowo – sterującym*. PAK 7-8/2004, str. 71 – 75
- [Jak04b] Jakubiec J.: *System pomiarowo – sterujący jako metrologiczny obiekt badań*. PAK 6/2004, str. 9 – 13
- [JakHam99] Jakubiec J., Hamid Al. Raimi: *Modelowanie opóźnień transmisji danych w systemach pomiarowych czasu rzeczywistego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Elektryka, z. 165, Gliwice 1999, str. 109 – 120
- [JakHamŻur01] Jakubiec J., Hamid Al. Raimi, Żurkowski R.: *Błędy wyniku pomiaru w systemie czasu rzeczywistego spowodowane opóźnieniami transmisji*. V Szkoła Konferencja Metrologia Wspomagana Komputerowo MWK'2001. Tom 2, str. 275 –280
- [JosPan96] Joseph M., Pandaya P.: *Finding Response Time in Real-Time System*. The Computer Journal, 1996, Vol. 29, No. 5, pp. 390-395
- [KimLee02] Kim D., Lee Y.: *Periodic and aperiodic task scheduling in strongly partitioned integrated real-time systems*. The Computer Journal, 2002, Vol. 45, No. 4, pp. 395 - 409
- [Kwi00] Kwiecień A.: *Analiza przepływu informacji w komputerowych sieciach przemysłowych* Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice 2000

- [Kwi00b] Kwiecień A.: *Przemysłowe sieciowe systemy rozproszone czasu rzeczywistego. Cechy i wymagania*. Studia Informatica Politechnika Śląska, Vol. 21, No. 1, Gliwice 2000, str. 439 – 449
- [KwiBigMró99] Kwiecień A., Bigewski Z., Mrówka Z.: *Analiza czasu najgorszego przypadku w sieciach przemysłowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Informatyka, z. 36, Gliwice 1999, str. 473 – 484
- [KwiGaj01] Kwiecień A., Gaj P.: *Kryteria doboru protokołów komunikacyjnych w sieciach przemysłowych*. Studia Informatica Politechnika Śląska, Vol. 22, No. 3, Gliwice 2001, str. 433 – 444
- [KwiFoj01] Kwiecień A., Gaj P.: *Kryteria integracji sieci przemysłowych najniższego poziomu*. Studia Informatica Politechnika Śląska, Vol. 22, No. 3, Gliwice 2001, str. 417 – 432
- [KwiCupFoj02] Kwiecień A., Cupek R., Fojcik M.: *Wybór metod integracji sieci przemysłowych najniższego poziomu z sieciami opartymi na rodzinie protokołów TCP/IP*. Studia Informatica Politechnika Śląska, Vol. 23, No. 3, Gliwice 2002, str. 219 – 237
- [LesSwi02] Lesiak P., Świsulski D.: *Komputerowa technika pomiarowa w przykładach*. PAK, Warszawa 2002
- [LiuLay73] Liu C., Layland J.: *Scheduling Algorithms for Multiprogramming in Hard-Real-Time Environment*. Journal of the ACM, 1973, Vol.20, No.1, pp. 46-61
- [Mar03] Markowski A.: *Modelowanie opóźnień transmisji danych w sieciowych systemach pomiarowo-sterujących*. VI Szkoła - Konferencja. Metrologia Wspomagana Komputerowo MWK '2003, Tom 2, str. 231 – 236
- [Mar04] Markowski A.: *Wyznaczanie opóźnień transmisji danych w sieciowych systemach pomiarowo-sterujących*. PAK 7-8/2004, str. 95 – 99
- [Mar05] Markowski A.: *Stanowisko do pomiaru opóźnień transmisji danych w sieciowych systemach pomiarowo – sterujących*. Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, Seria Konferencje nr 9, Zielona Góra 2005, str. 297 – 304
- [MarFur02] Markowski A., Furmankiewicz L.: *Integracja sieci przemysłowych z siecią Profibus DP*. PAK 7/2002, str. 73 – 76
- [MarMic00] Michta E., Markowski A.: *Zintegrowane sieci przemysłowe w systemach pomiarowych obiektów elektroenergetycznych*. PAR 4/2000, str. 12 - 16
- [MarMic00b] Markowski A., Michta E.: *Analiza dotrzymania warunków czasu rzeczywistego w rozproszonych systemach pomiarowo – kontrolnych*. Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i w Przemysle – SP'00, str. 159 - 168
- [MarMicSzu05] Markowski A., Miczulski W., Szulim R.: *On quality of measurement data in the process of knowledge acquisition*. 14th IMEKO Symposium on New Technologies

in Measurement and Instrumentation: 10th Workshop on ADC Modelling and Testing. Gdynia 2005, Vol. 1, str. 171—174

- [MarMicWin99] Markowski A., Michta E., Winiarczyk S.: *Metody integracji urządzeń z firmowym protokołem komunikacyjnym ze standardowymi sieciami przemysłowymi*. IV Szkoła – Konferencja Metrologia Wspomagana Komputerowo MWK'99, Tom 2, str. 117 - 122
- [MasMin01] Maśnicki R., Mindykowski J.: *Rozproszony system pomiarowy do wyznaczania parametrów okrętowych sieci elektroenergetycznych*. PAK 1/2003, str. 27 – 30
- [Mem89] Praca zbiorowa: *Mała encyklopedia metrologii*. WNT, Warszawa 1989
- [Mic98] Michta E : *Rozproszone systemy pomiarowo – kontrolne nowej generacji*. PAK 9/1998, Warszawa 1998, str. 344 – 347
- [Mic99] Michta E : *Przetwarzanie rozproszone w sieciach przemysłowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Informatyka, z. 36, Gliwice 1999, str. 485 – 498
- [Mic00] Michta E.: *Modele komunikacyjne sieciowego systemu pomiarowo sterującego*. Wydawnictwo Politechniki Zielonogórskiej, Zielona Góra 2000
- [Mic01] Michta E.: *Planowanie obciążenia sieci Profibus z występowaniem ograniczeń czasowych*. Studia Informatica Politechnika Śląska, Vol. 22, Gliwice 2001, str. 371- 384
- [Mic02] Michta E. : *Modele komunikacyjne w planowaniu wykonania zadań w sieciowych systemach pomiarowo – sterujących*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Elektryka, z. 181, Gliwice 2002, str. 107 – 126
- [Mic02b] Michta E.: *Scheduling Theory in Networked Measurement – Control Systems Design*. Proc. Of the IMECO TC7 Symp. “Measurement Science in the Information Era”, Cracow, Poland, June 25-27 , pp 197 202
- [Mic05] Michta E.: *Scheduling Systems*. JohnWiley & Sons, Ltd, 2005
- [Naw02] Nawrocki W.: *Komputerowe systemy pomiarowe*. WKŁ, Warszawa 2002
- [Sac98] Sacha K.: *Sieci miejscowe Profibus*. MIKOM, Warszawa 1998
- [Sen98] Senczyna S.: *Model symulacyjny sieci komputerowej w oparciu o standard VHDL*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Informatyka, z. 34, Gliwice 1998, str. 271 – 285
- [Sen01] Senczyna S: *Metoda analizy sieci komputerowej za pomocą modelu zdarzeniowego*. Studia Informatica Politechnika Śląska, Volume 22, Number 2, Gliwice 2001, str. 179 – 189
- [Sta88] Stancovic J.: *Real-Time Computing Systems: the Next Generation*. Hard Real-Time Systems. IEEE Computer Society Press, 1988, pp. 14-38

- [Tan97] Tanenbaum A.: *Rozproszone systemy operacyjne*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997
- [TinBurWel95] Tindell K., Burns A., Wellings A.: *Calculating CAN Message Response Time*. Control Engineering Practice, 1995, Vol. 3, No. 8, pp. 1163-1169
- [Tom96] Tomasik J.: *Symulacyjny model sieci sterowników przemysłowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Informatyka, z.30, Gliwice 1996, str. 231 - 236
- [Tys90] Tyszer J.: *Symulacja cyfrowa*, WNT Warszawa 1990
- [UhlHan02] Uhl T., Hanc A.: *Rozproszone systemy monitoringu w diagnostyce maszyn*. PAK 12/2002, str. 29 – 32
- [Upe94] Upender B. P.: *Analyzing Real-Time Characteristics of Class C Communication in C through Discrete Event Simulations*. Multiplexing and Fiberoptics, SP-1012, Society of Automotive Engineers, Feb. 1994, Paper No. 940133, pp. 25-34
- [UpeDea96] Upender B. P., Dean A.G.: *Variability of CAN Network Performens*. United Technologies Research Center 1996
- [WerŻab99] Werewka J., Żaba S.: *Szeregowanie wiadomości w rozproszonych systemach czasu rzeczywistego wykorzystujących magistrale miejscowe*; Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji, tom 45, z.1, Kraków 1999, str. 25 – 50
- [WerŻab99b] Werewka J., Drwal A.: *Projektowanie struktur magistral miejscowych dla rozproszonych systemów sterowania*. Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji, tom 45, z.1, Kraków 1999, str. 51 – 72
- [WerŻabDrw97] Werewka J., Żaba S., Drwal A.: *Protokoły dostępu i charakterystyki czasowe magistral miejscowych*. PAR 7/1997, str. 4 - 11
- [Win97] Winiecki W.: *Organizacja komputerowych systemów pomiarowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej WPW, Warszawa 1997
- [Żab01] Żaba S.: *Analiza czasowa rozproszonych systemów sterowania bazujących na magistralach miejscowych*. Rozprawa Doktorska, Akademia Górniczo Hutnicza Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki Kraków 2001.
- [Żab03] Żaba S.: *Analiza czasowa wybranych magistral miejscowych*. PAR 6/2003, str. 12 - 15
- [Żur04] Żurkowski R. : *Pomiar czasu reakcji systemu operacyjnego na zdarzenia zewnętrzne*. PAK 7-8/2004, str. 130 – 132
- [ŻurHam02] Żurkowski R, Al. Raimi Hamid: *Model realizacji zadań w systemie czasu rzeczywistego*. 23 Międzynarodowe Sympozjum Naukowe Studentów i Młodych Pracowników Nauki, Zielona Góra 2002, Zeszyt Elektrotechnika i Elektronika – systemy pomiarowe i diagnostyczne, str. 11 - 16