

Emil MICHTA

Instytut Metrologii Elektrycznej

Uniwersytet Zielonogórski

## **MODELE KOMUNIKACYJNE W PLANOWANIU WYKONANIA ZADAŃ W SIECIOWYCH SYSTEMACH POMIAROWO - STERUJĄCYCH**

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono strukturę sieciowego systemu pomiarowo - sterującego, dla którego opracowano trzywarstwowy model komunikacyjny oraz model zadania. Opracowane modele komunikacyjne wraz z elementami teorii szeregowania zadań wykorzystano do planowania zadań realizowanych w systemach pomiarowo - sterujących, w których występują ograniczenia czasowe. Wyniki analiz teoretycznych zilustrowano na przykładzie systemu z siecią CAN.

## **COMMUNICATION MODELS IN TASK SCHEDULING IN NETWORKED MEASUREMENT – CONTROL SYSTEMS**

**Summary.** In the paper structure, a three level communication model and task model of a networked measurement - control system are presented. Communication models and scheduling theory are used to tasks scheduling for measurement - control systems with real-time requirements. Results of theoretical analysis were used to scheduling tasks in CAN-base system.

## 1. WPROWADZENIE

W artykule rozpatruje się systemy pomiarowo – sterujące (SPS) o architekturze sieciowej, pracujące na obiektach lub procesach technologicznych, w odniesieniu do których stawiane są wymagania dotrzymania ograniczeń czasowych. Ewolucja SPS ze scentralizowanej struktury multiplekserowej z prostymi węzłami i z wyjściem analogowym do rozproszonej struktury sieciowej z inteligentnymi węzłami i cyfrowym wyjściem komunikacyjnym stworzyła nową sytuację, wymagającą podejmowania na etapie ich projektowania istotnych decyzji dotyczących doboru takich wartości parametrów inteligentnych węzłów i parametrów systemu komunikacyjnego, które zagwarantowałyby poprawne funkcjonowanie obiektu lub procesu technologicznego. W dalszej części artykułu zaprezentowano model węzła i model interfejsu komunikacyjnego, które wraz z elementami teorii szeregowania zadań pozwalają na ocenę parametrów czasowych systemu na etapie jego projektowania.

Rozwój SPS doprowadził do powstania systemów o architekturze sieciowej, które znajdują się obecnie w okresie dużej dynamiki ich rozwoju [1,2,4]. Rosnąca liczba produkowanych inteligentnych urządzeń pomiarowo – sterujących z cyfrowym wyjściem komunikacyjnym oraz powszechnie stosowane programy użytkowe wykorzystujące dane pomiarowe i dane sterujące stwarzają możliwości budowy SPS, oferujących użytkownikowi wiele nowych możliwości w porównaniu z klasycznymi rozwiązaniami tych systemów (decentralizacja przetwarzania, przetwarzanie rozproszone na poziomie węzłów itp.). SPS stanowią ważny element obiektu lub procesu technologicznego, zatem od tych systemów wymaga się spełnienia wysokich wymogów niezawodnościowych przy relatywnie niskich kosztach. W wielu przypadkach podstawowym wymogiem stawianym SPS przez obiekt, proces technologiczny lub aplikację informatyczną jest dotrzymanie ograniczeń czasowych. Ze względu na rozmiar, znaczenie i brak narzędzi projektowych zagadnienia te stanowią obiekt wielu międzynarodowych prac badawczych [2,9].

Wśród wielu rozwiązań SPS dominują systemy o topologii magistrali. Są one mniej elastyczne niż systemy budowane zgodnie z wymogami okablowania strukturalnego (normy: EIA/TIA-568, PN50170), ale ich zaletą jest prostota, niskie koszty materiałowe i instalacyjne, co uzasadniałoby ich zdecydowaną dominację w zastosowaniach przemysłowych. W procesie projektowania SPS o architekturze sieciowej istotne jest rozwiązanie sposobu pracy poszczególnych węzłów oraz sposobu pracy systemu komunikacyjnego. Przedstawione w artykule modele komunikacyjne pozwalają na ocenę parametrów czasowych proponowanego rozwiązania SPS.

## 2. ELEMENTY SYSTEMÓW POMIAROWO – STERUJĄCYCH

Na rys. 1 przedstawiono podstawowe elementy tworzące współcześnie opracowywane systemy pomiarowo – sterujące.



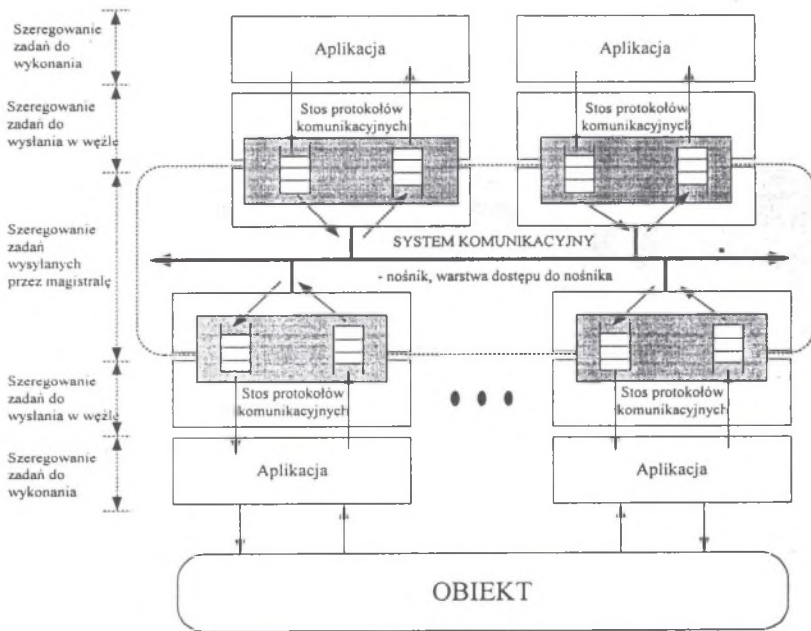
Rys. 1. Elementy systemu pomiarowo - sterującego

Fig. 1. Components of a measurement - control system

Podstawowym elementem systemu jest aparatura pomiarowo – sterująca wykorzystywana do pozyskiwania informacji z obiektu i do oddziaływania na obiekt. Na poziomie tej warstwy może być realizowane przetwarzanie informacji pozyskiwanej przez dany węzeł lub informacji pochodzącej od innych węzłów uzyskanej za pośrednictwem systemu komunikacyjnego. Węzeł jest urządzeniem pomiarowym lub sterującym posiadającym wyjście do sieci przemysłowej. W zależności od wymagań stawianych przez nadzorowane obiekty lub procesy technologiczne różny jest stopień złożoności aparatury pomiarowo – sterującej i systemu komunikacyjnego, umożliwiającego przesyłanie informacji zarówno pomiędzy poszczególnymi węzłami, jak i pomiędzy węzłami a aplikacjami informatycznymi, stanowiącymi sprzężenie pomiędzy użytkownikami a procesem technologicznym. Ważnym elementem systemu pomiarowo – sterującego są aplikacje informatyczne służące do konfigurowania systemów pomiarowo – sterujących, wizualizacji stanu i diagnostyki obiektów. Rozpatrywane w artykule zagadnienia dotyczą oceny systemu komunikacyjnego oraz jego węzłów tworzących aparaturę pomiarowo – sterującą.

### 3. MODEL KOMUNIKACYJNY SYSTEMU POMIAROWO - STERUJĄCEGO

Sieciowy system pomiarowo - sterujący 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 [9] lub w postaci wartości zadanych oraz danych sterujących mogą być przekazywane do węzłów sprzężonych z obiektem. Model komunikacyjny systemu przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Model komunikacyjny sieciowego systemu pomiarowo - sterującego  
 Fig. 2. Communication model of a measurement - control system

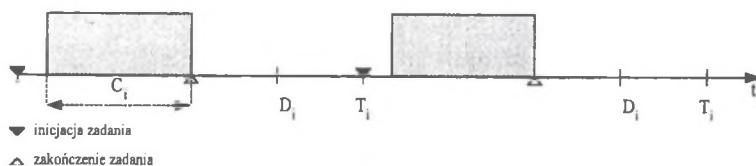
Na poziomie aplikacji węzły wykonują zadania związane z realizacją algorytmów, przetwarzaniem danych pomiarowych, przetwarzaniem informacji dwustanowych itp. Zadania są programami wykonywanymi przez mikroprocesor. Zadania pracujące w węzle są w nim umieszczane przez producenta węzła lub przez użytkownika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

Zadanie  $z_i$  realizowane w węźle  $w_i$  może być scharakteryzowane przez trzy następujące liczby: okres występowania zadania  $T_i$ , względne ograniczenie czasowe zadania  $D_i$  (odniesione do chwili wystąpienia żądania wykonania zadania  $z_i$ ) oraz przez czas wykonania zadania  $C_i$  (w analizach uwzględniany jest najgorszy przypadek czasu wykonania). Ograniczenie czasowe zadania oznacza limit czasu, przed upływem którego procesor powinien skończyć wykonywanie zadania. Zwykle względne ograniczenie czasowe zadania jest mniejsze lub równe okresowi występowania zadania.

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.

Ważnym elementem węzła jest stos protokołów komunikacyjnych odpowiedzialny za przesyłanie informacji pomiędzy warstwą aplikacyjną a systemem komunikacyjnym. W odróżnieniu od poziomu aplikacji zarówno stos protokołowy, jak i system komunikacyjny są najczęściej zestandaryzowane, tzn., że są zgodne z unormowaniami międzynarodowymi. Dane pomiarowe i dwustanowe przekazywane są z/do obiektu przez system komunikacyjny sieciowego systemu pomiarowo - sterującego i stos protokołowy węzłów.

W systemach sieciowych zadania mają najczęściej charakter okresowy (rys. 3). Zadanie okresowe  $z_i$  jest reprezentowane przez nieujemną trójkę  $(T_i, C_i, D_i)$ , gdzie  $T_i, C_i, D_i$  są odpowiednio okresem występowania zadania, czasem realizacji zadania i ograniczeniem czasowym zadania. W prowadzonych analizach uwzględniane są najgorsze przypadki wartości czasów  $T_i, C_i, D_i$ . Okres występowania zadania  $T_i$ , czas jego wykonania  $C_i$  oraz ograniczenie czasowe zadania  $D_i$  powinny spełniać warunek:  $C_i < D_i \leq T_i$ .



Rys. 3. Parametry czasowe zadania okresowego

Fig. 3. Time parameters of a period task

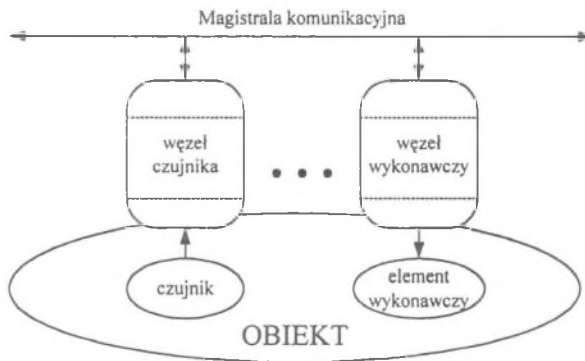
Inicjację zadania należy rozumieć jako wystąpienie zdarzenia, od którego rozpoczyna się liczenie czasu (start odliczania okresu). Jeżeli warunki na to pozwalają, to rozpoczęcie wykonywania zadania może nastąpić bezpośrednio po jego aktywacji lub jeżeli wykonanie zadania blokowane jest przez inne, aktualnie wykonywane zadania, to aktywowane zadanie oczekuje na rozpoczęcie realizacji. Jeżeli w projektowanym systemie zbiór zadań jest zbiorem zadań wykonywalnych, to wówczas podczas  $m$ -tej aktywacji zadania okresowego  $z_i$  musi ono zostać wykonane przed upływem czasu ograniczenia czasowego dla tego zadania, które wynosi  $(m-1) * T_i + D_i$ .

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

Funkcje szeregowania i przełączania zadań są wykonywane przez procesor węzła w określonym czasie i zajmują jego czas, blokując w ten sposób wykonywanie innych zadań. Zadania wykonywane przez procesor węzła lub zadania polegające na przesłaniu ramek przez system komunikacyjny nie powinny siebie zawieszać. Dla zbioru zadań okresowych wyznaczany jest współczynnik  $U$  wykorzystania procesora lub systemu komunikacyjnego, definiowany jako  $\sum C_i / T_i$ . Współczynnik ten jest podstawowym warunkiem realizowalności zadań przez procesor lub system komunikacyjny [3,9,12,14]. Parametry węzła i systemu komunikacyjnego powinny być tak dobrane, aby wartość tego współczynnika była mniejsza od jedności.

#### 4. MODEL ZADANIA

Podstawę do konstrukcji modelu zadania w SPS stanowią przedstawione na rys. 3 parametry czasowe zadania okresowego. Nie obejmują one jednak wszystkich sytuacji, które mogą wystąpić podczas pracy systemu na poszczególnych jego poziomach. Zatem w celu zbudowania modelu zadania uwzględniającego pozostałe uwarunkowania występujące w SPS rozpatrzono elementarny model SPS przedstawiony na rys. 4.

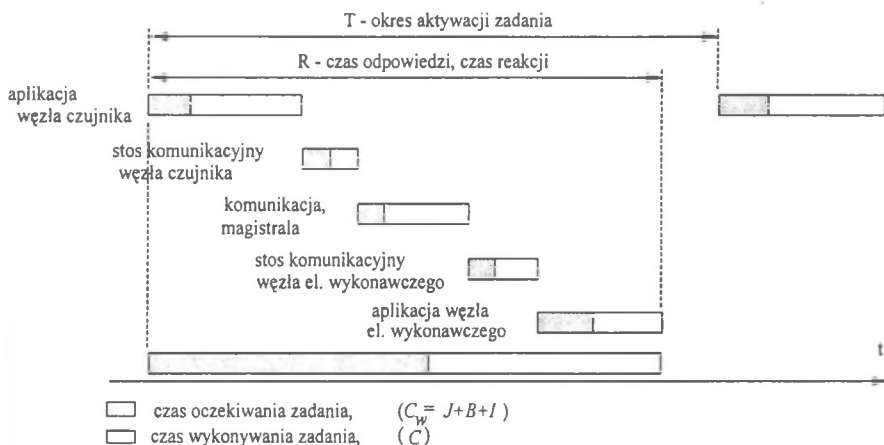


Rys. 4. Model podstawowy analizowanego systemu

Fig. 4. Time parameters of a period task



Dla najprostszego modelu SPS przedstawionego na rys. 4 i przy uwzględnieniu trzypoziomowego modelu komunikacyjnego SPS otrzymujemy model dla zadania okresowego SPS, który przedstawiono na rys. 5. Czas oczekiwania  $C_w$  zadania  $z_i$  na jego wykonanie jest konsekwencją ograniczonych możliwości zasobów wykorzystywanych w danym miejscu systemu pomiarowo - sterującego 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 pewnych granicach. Precyzyjne oszacowanie wartości zakresu zmian czasu oczekiwania na etapie projektowania systemu jest niezbędne do oceny przydatności projektowanego systemu i do zestrojenia parametrów systemu z parametrami obiektu. Potrzeba przeprowadzania takich analiz występuje zwłaszcza w przypadku projektowania systemów, w których występują ograniczenia czasowe.



Rys. 5. Model zadania  
Fig. 5. Task model

Minimalna wartość czasu opóźnienia lub czasu reakcji na zdarzenie równa jest sumie czasów wykonania zadania na poszczególnych poziomach. Maksymalna wartość czasu opóźnienia jest sumą maksymalnych wartości czasów oczekiwania i czasów wykonania zadania.

Czas wykonania zadania  $C$  na każdym z trzech poziomów SPS jest najczęściej różny i zależy od on wielu czynników. Na poziomie procesora węzła zależy on od procesora, jego

zegara i złożoności obliczeniowej zadania. Na poziomie systemu komunikacyjnego czas wykonania zadania zależy od prędkości transmisji, długości pola danych i metody kodowania. Dla danego urządzenia i dla danego systemu komunikacyjnego czasy wykonania zadań można traktować odpowiednio jako parametr urządzenia i parametr systemu komunikacyjnego. Na rys. 6 przedstawiono czasy wykonania zadania w systemie komunikacyjnym z różnymi protokołami w systemie z rys. 4, przyjmując dwubajtowe pole danych i dwie wartości prędkości transmisji: jednakową dla wszystkich protokołów  $V_{tr} = 500\text{ kbit/sek.}$  oraz maksymalną dla danego protokołu. Wartości czasów wykonania zadania dla poszczególnych protokołów komunikacyjnych wyznaczono z poniższych zależności [6,7,9,12]:

$$C_{can} = \frac{1}{V_{tr}} \left( \frac{34 + 8L_{dane}}{5} + L_{ster} + 8L_{dane} \right), \quad (1)$$

$$C_{profi} = \frac{1}{V_{tr}} \left[ 2T_{syn} + (L_{ster}^{ini} + L_{ster}^{odp} + L_{dane}^{ini} + L_{dane}^{odp}) \cdot 11 \right], \quad (2)$$

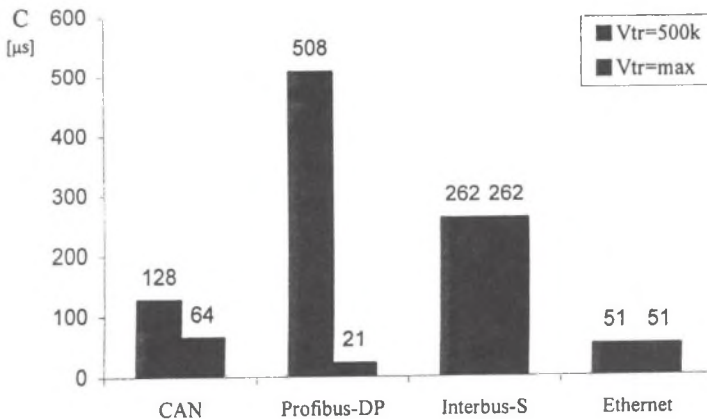
$$C_{ibus} = \frac{1}{V_{tr}} (13(L_{ster} + NL_{dane})), \quad (3)$$

$$C_{Eith} = \frac{1}{V_{tr}} ((L_{ster} + L_{dane}) \cdot 8), \quad (4)$$

gdzie:  $L_{dane}$  – długość pola danych ramki w bajtach,

$L_{ster}$  – długość pól sterujących ramki,

$T_{syn}$  – czas synchronizacji pomiędzy cyklami komunikacyjnymi (min. 33 bity).



Rys. 6. Parametry czasowe zadania okresowego

Fig. 6. Time parameters of a period task



Przedstawione na rys. 6 wyniki dla prostego przypadku pokazują duży zakres zmienności uzyskiwanych wyników, co oznacza, że wybór systemu komunikacyjnego i jego parametrów powinien być poprzedzony wykonaniem analiz, na bazie których można dokonać trafnych wyborów. W dalszej części artykułu przedstawiono metody analityczne pozwalające na weryfikację założeń stawianych systemowi pomiarowo – sterującemu.

## 5. PLANOWANIE WYKONANIA ZADAŃ

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 w zadanym czasie.

### 5.1. Zasady przydzielania priorytetu zadaniom

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: *mniejść 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 [9]. Jej wadą jest większe obciążenie procesora zadaniami szeregowania podczas pracy.

## 5.2. 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 systemu technikę wywłaszczania realizowanych zadań można stosować jedynie na poziomie aplikacji. Ze względów 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 wywłaszczania zadań.

Na etapie projektowania systemów pomiarowo – sterujących, którym stawiane są wymagania czasu rzeczywistego, należy formalnie wykazać, że podczas pracy wszystkie ograniczenia czasowe stawiane poszczególnym zadaniami zostaną spełnione. Stosowanie rozwiązań bazujących na intuicji i doświadczeniu może być skuteczne 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 niedotrzymanie może spowodować skutki katastroficzne, wykonanie wstępnych analiz czasowych bazujących na modelach formalnych jest niezbędne.

## 5.3. Szeregowanie zadań metodą *RM* ze stałym przypisaniem priorytetu

Do przypisania priorytetu zgodnie z metodą *RM* wprowadzono następujący warunek pozwalający na weryfikację spełnienia warunków *RT* i gwarantujący, że *N* zadań zostanie wykonanych przed upływem ich ograniczenia czasowego:

$$\sum_{i=1}^N \frac{C_i}{T_i} \leq N(2^{1/N} - 1), \quad (5)$$

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. Zagadnienie to można byłoby uznać za wyczerpane pod względem badawczym, jeżeli w prowadzonych rozważaniach wyróżnić jeszcze dwa przypadki przyjmując wartość ograniczenia czasowego  $D < T$  oraz  $D > T$ . Ze względu na małą przydatność praktyczną wyników tych analiz w pracy nie zostaną one zamieszczone.

Warunek (5) dotyczy niezależnych zadań ze względnym ograniczeniem czasowym równym okresowi występowania zadania przy założeniu, że zadania mogą być wywłaszczane. Warunek ten jest warunkiem dostatecznym, ale niewystarczającym. W literaturze można znaleźć takie przykłady, w których warunek nie jest spełniony, a zadania są szeregowe [8,11]. Podejmowane były próby modyfikowania nierówności (5), ale uzyskiwane zależności były o wiele bardziej skomplikowane, jedynie nieznacznie poprawiając efekt końcowy, wykluczający istnienie takich przypadków, w których zadania nie spełniają warunku szeregowalności (5), ale są szeregowalne [8,12]. Modyfikacje podstawowego warunku szeregowalności prowadziły do rozbudowanych zależności i wymagały dysponowania danymi, które są trudno dostępne, a jeżeli już są dostępne, to ich oszacowanie jest mało precyzyjne, zatem bez utraty zasadniczej przydatności wyników analiz można stosować nierówność (5).

Ze względu na często występujące powiązania pomiędzy zadaniami realizowanymi w węzłach sieciowego systemu pomiarowo – sterującego duże znaczenie praktyczne mogą mieć wyniki analiz uwzględniające występujące w systemie powiązania. W przypadku występowania zadań zależnych warunek (5) 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 (5) jest łatwiejsze do osiągnięcia.

#### **5.4. Szeregowanie zadań metodą RM ze stałym przypisaniem priorytetu bez wywłaszczania zadań**

Analiza dotrzymania warunków czasu rzeczywistego w systemach bez wywłaszczania zadań ma w przypadku sieciowych systemów pomiarowo – sterujących 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. Poza generowaniem sztucznych kolizji w lokalnych sieciach komputerowych podczas współpracy urządzeń sieciowych (przełączników) tego samego standardu ale o różnych prędkościach transmisji (10/100/1000 Mbit/s) autorowi nie są znane rozwiązania stosujące wywłaszczanie przesyłanej ramki komunikacyjnej.

W systemach bez wywłaszczania zadań mogą wystąpić sytuacje, w których zadania o niższym priorytecie blokują te zadania o wyższym priorytecie, które pojawiły się po

rozpoczęciu wykonywania zadania o niższym priorytecie. Oznaczając przez  $B_i$  maksymalny czas blokowania zadania  $i$  nierówność (5) można zmodyfikować do postaci:

$$\sum_{i=1}^i \left( \frac{C_i}{T_i} \right) + \frac{B_i}{T_i} \leq i \cdot (2^{1/i} - 1), \forall_{i, 1 \leq i \leq N} \quad (6)$$

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

$$\begin{cases} B_i = 0 & \text{jeżeli } P_i = \min\{P_j\} \text{ dla } j=1, \dots, N \\ B_i = \max\{C_j\}, j \in lp(i), & \text{jeżeli } P_i \neq \min\{P_j\} \text{ dla } j=1, \dots, N, \end{cases} \quad (7)$$

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

$$\sum_{i=1}^N \left( \frac{C_i}{T_i} \right) + \max_{i, 1 \leq i \leq N} \left\{ \frac{B_i}{T_i} \right\} \leq i \cdot (2^{1/N} - 1), \forall_{i, 1 \leq i \leq N} \quad (8)$$

Przedstawione nierówności (5, 6 i 7) 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  $v$ , nierówność (7) można zmodyfikować do następującej postaci:

$$vC_r + \sum_{i=1}^N \left( \frac{C_i}{T_i} \right) + \max_{i, 1 \leq i \leq N} \left\{ \frac{B_i}{T_i} \right\} \leq i \cdot (2^{1/N} - 1), \forall_{i, 1 \leq i \leq N}, \quad (9)$$

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.

### 5.5. Szeregowanie zadań metodą RM - czas odpowiedzi w systemach z wyłączeniem zadań

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

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

Dowiedziano [3], że najbardziej niekorzystną sytuacją do 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:

$$R_i = I_i + C_i ,$$

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  $i$ . W celu 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  $i$ , maksymalny czas interferencji możemy określić z następującej zależności:

$$I_i = \sum_{j \in hp(i)} \left( \left\lceil \frac{R_i}{T_j} \right\rceil C_j \right), \quad (10)$$

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

Wykorzystując równania (9) i (10) dochodzi się do równania rekurencyjnego:

$$R_i^{n+1} = \sum_{j \in hp(i)} \left( \left\lceil \frac{R_i^n}{T_j} \right\rceil C_j \right) + C_i, \quad (11)$$

gdzie  $n$  jest kolejnym krokiem iteracji.

Rozwiązanie równania rekurencyjnego uzyskujemy, jeżeli  $R_i^{n+1} = R_i^n$ . Jeżeli zadania  $1 \dots N$  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  $R_{i, min}$ , 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 szeregowalne.

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, oznacza to, że zadanie to nie jest szeregowane, tzn. że istnieje możliwość wystąpienia sytuacji, w której nie będzie możliwe wykonanie zadania przed upływem jego ograniczenia.

### 5.6. 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 (11) na najgorszy przypadek czasu odpowiedzi przyjmie następującą postać:

$$R_i^{n+1} = B_i + \sum_{j \in lp(i)} \left( \left[ \frac{R_j^n}{T_j} \right] C_j \right) + C_i, \quad (12)$$

gdzie  $B_i$  jest wyznaczany w następujący sposób:

$$\begin{cases} B_i = 0 & \text{jeżeli } P_i = \min\{P_j\} \\ B_i = \max\{C_j\}, j \in lp(i), & \text{jeżeli } P_i \neq \min\{P_j\} \end{cases} \text{ dla } j = 1, \dots, N, \quad (13)$$

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 jednoprosesorowych może być wykorzystana do prowadzenia analiz dotrzymania ograniczeń czasowych i do wyznaczania czasu reakcji na zdarzenia w sieciowych systemach pomiarowo - sterujących, 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 systemu pomiarowo - sterującego, 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 tabelicy 1 zestawiono wybrane metody szeregowania zadań z pokazaniem możliwości ich wykorzystania do planowania wykonania zadań na różnych poziomach przedstawionego w punkcie drugim modelu komunikacyjnego systemu pomiarowo - sterującego.

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, wybór metody jest prosty i nie ma on dużego wpływu na osiągane 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.

Tabela 1

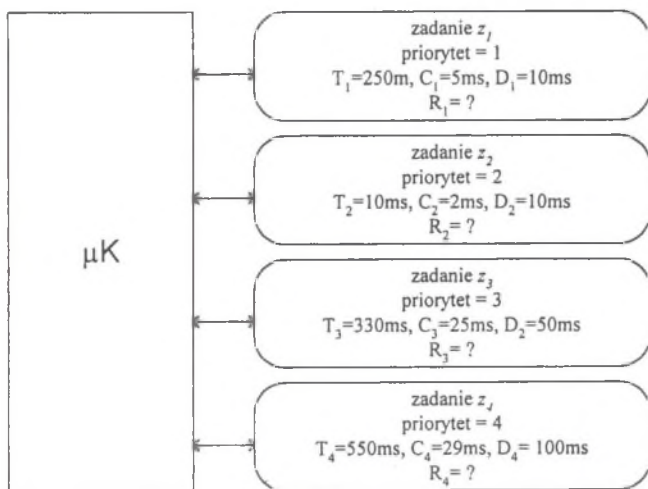
Zestawienie metod szeregowania zadań możliwych do wykorzystania w SPS

Miejsce Realizacji Zadania	Metody szeregowania zadań							
	<i>RD</i> (Round Robin)		<i>RM</i> (Rate Monotonic)		<i>DM</i> (Deadline Monotonic)		<i>EDF</i> (Earliest Deadline First)	
	z wyłącz.	bez wyłącz.	z wyłącz.	bez wyłącz.	z wyłącz.	bez wyłącz.	z wyłącz.	bez wyłącz.
Procesor Węzła	-	+	+	+	+	+	+	+
Procesor komunikacyjny	-	+	-	+	-	+	-	+
System komunikacyjny	-	+	-	+	-	+	-	-

- nie stosowane, + możliwa do wykorzystania

## 6. PRZYKŁAD PLANOWANIA WYKONANIA ZADAŃ METODĄ *DM*

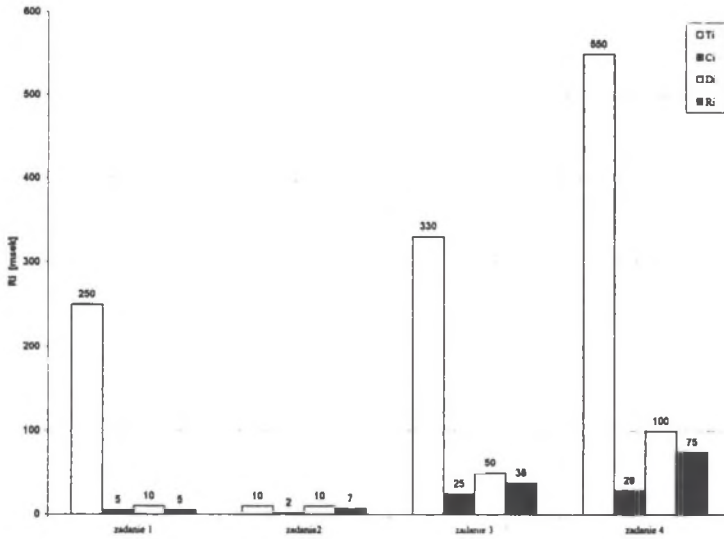
Rozpatrzmy prosty przypadek planowania wykonania 4 zadań na poziomie aplikacji oraz na poziomie systemu komunikacyjnego wykorzystując metodę *DM* do przypisania priorytetów poszczególnym zadaniom. W celu oceny analizy porównawczej przyjęto, że parametry czasowe i ograniczenia czasowe zadań wykonywanych na poziomie aplikacji i na poziomie systemu komunikacyjnego są takie same. Na poziomie aplikacji będzie pracował jeden mikrokomputer, który dopuszcza pracę z wywłaszczaniem zadań (rys. 7).



Rys. 7. Planowanie wykonania zadań na poziomie aplikacji

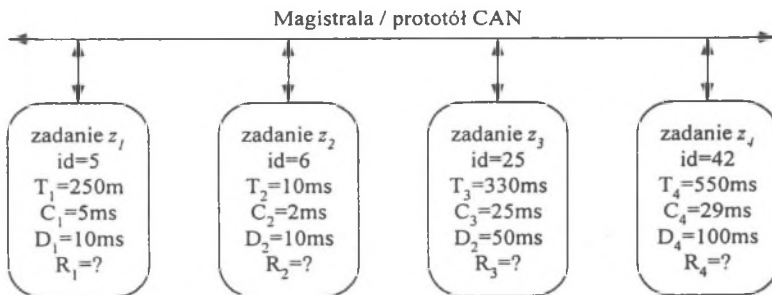
Fig. 7. A task scheduling on the application layer

Planuje się zbudowanie systemu komunikacyjnego pracującego w oparciu o standard CAN [5], zatem do planowania wykonania zadań można wykorzystać metodę *DM* bez wywłaszczania zadań. Poszczególnym zadaniom przypisano priorytet według zasady: najkrótsze ograniczenie czasowe - najwyższy priorytet. Korzystając z zależności (11), dla każdego z czterech zadań obliczono najgorszy przypadek czasu odpowiedzi  $R_i$ . Warunkiem koniecznym dotrzymania ograniczeń czasowych jest, aby czasy odpowiedzi dla danego zadania były krótsze od ograniczeń czasowych  $D_i$  stawianych temu zadaniu. Dla przypadku przedstawionego na rys. 7 otrzymano wyniki przedstawione na rys. 8. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że dla wszystkich czterech zadań ograniczenia czasowe będą dotrzymane.



Rys. 8. Wyniki szeregowania zadań metodą DM z wyłączeniem  
 Fig. 8. Results of a task scheduling with DM pre-emptive method

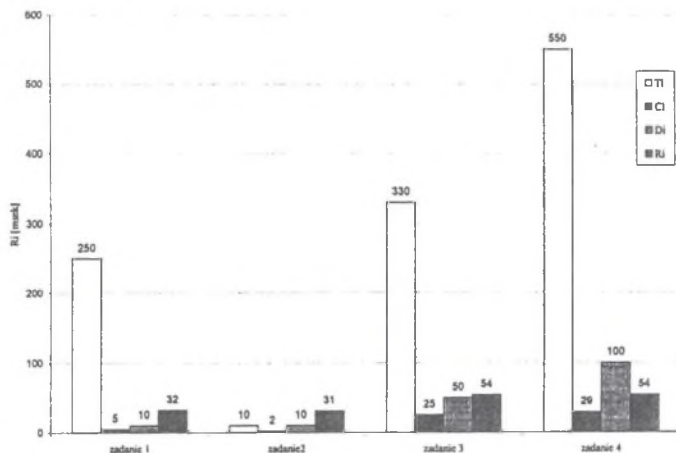
Na poziomie systemu komunikacyjnego (rys. 9) poszczególnym zadaniom polegającym na przesłaniu wiadomości przez magistralę wykonywanym przez różne węzły podłączone do tego samego segmentu sieci przemysłowej CAN przypisano identyfikatory w taki sposób, ażeby zdanie o najkrótszym ograniczeniu czasowym posiadało najniższy identyfikator.



Rys. 9. Planowanie wykonania zadań na poziomie komunikacyjnym  
 Fig. 9. A task scheduling on the communication layer

Korzystając z zależności (12) dla każdego z czterech zadań obliczono najgorszy przypadek czasu odpowiedzi  $R_i$ . Z przedstawionych na rys. 10 rezultatów szeregowania zadań metodą DM bez wyłączenia zadań wynika, że jedynie dla zadania czwartego będą dotrzymane stawiane mu ograniczenia czasowe. W pozostałych przypadkach podczas

funkcjonowania systemu może wystąpić sytuacja, podczas której stawiane poszczególnym zadaniom ograniczenia czasowe nie będą dotrzymane. W tej sytuacji należy zmienić parametry systemu komunikacyjnego np. poprzez podniesienie prędkości transmisji w sieci przemysłowej do takiej wartości, która będzie gwarantowała dotrzymanie ograniczeń czasowych dla wszystkich zadań.



Rys. 10. Wyniki szeregowania zadań metodą *DM* bez wywłaszczania  
 Fig. 10. Results of a task scheduling with *DM* non-pre-emptive method

## 7. PODSUMOWANIE

Przedstawiony w artykule model komunikacyjny sieciowego SPS, model zadania oraz metodyka postępowania z wykorzystaniem elementów teorii szeregowania zadań pozwalają na etapie projektowania na oszacowanie stopnia dotrzymania ograniczeń czasowych dla każdego zadania wykonywanego na poziomie aplikacji, stosu komunikacyjnego oraz na poziomie komunikacyjnym. Przedstawiony w artykule przykład planowania wykonania zadań metodą *DM* wskazuje na to, że wykorzystanie tej samej metody na poziomie aplikacji i na poziomie komunikacyjnym prowadzi do różnych rezultatów. Na bazie zaprezentowanego rozwiązania istnieje możliwość opracowania programu narzędziowego wspomagającego wykonywanie prac projektowych SPS, w których występują ograniczenia czasowe.

## LITERATURA

1. Alippi C., Ferrari S., Piuri V., Sami M., Scotti F.: New Trends in Intelligent System Design for Embedded and Measurement Application. IEEE I & M, June/99, pp. 36-44.
2. Automation Research Corporation: Device & Field Network Global Outlook. Market Studies, 1999.
3. Audsley N., Burns A., Richardson M., Tindell K., Wellings A.: Applying New Scheduling Theory to Static Priority Pre-emptive Scheduling. Software Engineering Journal, Vol. 8, No. 5, pp 285-292.
4. Boroń W.: Charakterystyka zdecentralizowanych systemów sterowania. Pomiar Automatyka Kontrola, 6/1998, pp. 203-206.
5. CAN Product Guide. CiA, Erlangen, 1997.
6. Hewlett-Packard. Industrial Ethernet. 1998.
7. Jordan J. R.: Serial Networked Field Instrumentation. Wiley Series in Measurement Science and Technology. 1995.
8. Joseph M., Pandaya P.: Finding Response Time in Real-Time System. The Computer Journal, 1996, Vol. 29, No. 5, pp. 390-395.
9. Michta E.: Modele komunikacyjne sieciowego systemu pomiarowo – sterującego. Monografia 99, Wydawnictwo Politechniki Zielonogórskiej, Zielona Góra 2000.
10. Michta E., Markowski A.: Analiza dotrzymania warunków czasu rzeczywistego w rozproszonych systemach pomiarowo – kontrolnych. III Konferencja Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i w Przemysle. Zielona Góra 2000, pp. 159-168.
11. Stancovic J.: Real-Time Computing Systems: the Next Generation. Hard Real-Time Systems. IEEE Computer Society Press, 1988, pp. 14-38.
12. Tindell K., Burns A., Wellings A.: Calculating CAN Message Response Time. Control Engineering Practice, 1995, Vol. 3, No. 8, pp. 1163-1169.
13. Werewka J., Żaba S.: Szeregowanie wiadomości w rozproszonych systemach czasu rzeczywistego wykorzystujących magistrale miejscowe. Elektronika i Telekomunikacja, 1999, pp. 25-50.
14. Zuberi K., Shin K.: Scheduling of Messages on CAN for Real- CIM Applications. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1997, pp. 310-314.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy Jakubiec, prof. Politechniki Śląskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 1 grudnia 2001

## Abstract

In the paper communication models and scheduling theory used to tasks scheduling for measurement - control systems with real-time requirements are presented. Basic components of networked measurement – control systems (NMCS) are presented in Fig.1. The communication model of a NMCS proposed by author is presented in Fig.2. This model has three levels: application, communication protocol stack and communication system level. For each level there is proposed a general-purpose task model shown in Fig.3 and 5. In Fig.6 there are presented results of a task execution time for communication system of a NMCS shown in Fig.4, which is based on CAN, Profibus-DP, Interbus-S and Ethernet protocols.

In section 5 the static methods *RM* and *DM* for a task scheduling and a response time calculating for each periodic task with real - time requirements in pre-emption and non-pre-emption schema are outlined. Results of a theoretical analysis are used to calculating a task response time in CAN-base system. The *DM* method is used for calculating a task response time of a forth tasks with the same parameters executed on application and communication levels. The final results shown in Fig.8 and 10 indicate that tasks executed on an application level comply his deadlines and tasks executed on a communication level do not comply his deadline. The results of theoretical analysis presented in the paper can be used to work out NMCS CAD tool.