ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1998
Seria: AUTOMATYKA z. 124 Nr kol. 1389

Jerzy CYKLIS, Adam SŁOTA
Politechnika Krakowska

OBIEKTOWO-OBSERWOWALNA SIEĆ PETRIEGO W ZASTOSOWANIU DO MODELOWANIA ELASTYCZNYCH SYSTEMÓW WYTWARZANIA

Streszczenie. W artykule przedstawiono definicję obiektowo-obserwowalnej sieci Petriego. W modelu ESP zbudowanym w oparciu o zaproponowaną definicję dostępne są w sposób bezpośredni, w postaci bieżącego oznakowania sieci, informacje o dostępności każdego obiektu modelowanego systemu do rozpoczęcia określonych czynności. Jest to szczególnie istotne przy próbie realizacji sterowania rozproszonego. Przedstawiony przykład ilustruje proponowane definicje oraz ich zastosowanie.

OBJECT-OBSERVABLE PETRI NET IN MODELLING OF FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS

Summary. The paper presents definition of object-observable Petri net. There is a convenient way to get information about the state of any object in the model of FMS based on proposed definition. This is because each state of each object of the modeled system, considered as readiness to take part in an activity, is represented by separate place in the net. Presented approach is especially useful when a distributed control is considered. The example presented at the end of the paper illustrates applying of the proposed definition.

1. Wstęp

Wzrost złożoności współczesnych, zautomatyzowanych systemów produkcyjnych oraz szybki rozwój dostępnych środków informatycznych przy równoczesnym, realnym spadku ich cen stwarza warunki do podjęcia próby realizacji idei decentralizacji sterowania. Wymaga to stosowania odpowiednich narzędzi do modelowania i przeprowadzania analizy zbudowanego modelu. Narzędzia takie z jednej strony powinny być proste i łatwe w użyciu, bo tylko takie znajdą zastosowanie w praktyce, z drugiej strony zaś powinny spełniać charakterystyczne wymagania pojawiające się przy modelowaniu systemów ze sterowaniem rozproszonym. Jednym z takich wymagań jest zapewnienie "obserwowalności" obiektów systemu. Wynika to z faktu, że lokalne układy sterowania, związane z poszczególnymi obiektami systemu, przejmując (całkowicie lub częściowo) funkcje centralnego układu sterowania, muszą mieć bieżący dostęp do informacji o stanie swojego otoczenia, tzn. muszą być dostępne informacje o stanie obiektów systemu, których współdziałanie jest niezbędne dla zapewnienia prawidłowej pracy systemu jako całości.

Sieci Petriego są często stosowanym narzędziem w modelowaniu zautomatyzowanych systemów produkcyjnych, ze względu na dostępność graficznej reprezentacji oraz łatwość analizy zbudowanego modelu. Jednak w klasycznej sieci Petriego jedno miejsce może reprezentować równocześnie stan kilku obiektów, co utrudnia bieżące śledzenie stanów pojedynczych obiektów systemu. Nie jest zatem spełniony postulowany warunek obserwowalności. W związku z powyższym autorzy podjęli próbę modyfikacji definicji sieci Petriego przez wprowadzenie warunków zapewniających możliwość obserwacji obiektów modelowanego systemu na potrzeby modelowania zautomatyzowanych systemów wytwarzania.

2. Definicja obiektowo-obserwowalnej sieci Petriego

Przy modelowaniu zautomatyzowanych systemów produkcyjnych rozpatruje się dwa rodzaje obiektów: obiekty stałe, którymi z reguły są urządzenia i maszyny technologiczne, oraz obiekty przepływające przez system. Obiektami przepływającymi przez system są zwykle przedmioty obrabiane, przy czym ich liczba określona jest liczbą typów przedmiotów, które mogą być równocześnie obrabiane w systemie.

Każdemu z wyodrębnionych obiektów, zarówno obiektowi stałem,u jak i przepływającemu przez system, można przyporządkować skończony zbiór czynności, w których obiekt bierze udział, oraz skończony zbiór stanów gotowości do wykonania czynności.

O ile nie jest rozpatrywany problem diagnostyki, to obiekty uczestniczące w wykonywanych czynnościach mogą być traktowane jako obiekty niedostępne na danym etapie pracy systemu z punktu widzenia sterowania całością systemu. Istotną rolę natomiast odgrywają obiekty będące w stanie gotowości do wykonania czynności, ponieważ to na podstawie ich dostępności oraz algorytmu działania systemu generowane są kolejne decyzje rozpoczęcia czynności.

Kierując się powyższymi przesłankami, autorzy przyjęli następujące zasady leżące u podstaw, proponowanej w dalszej części pracy, definicji obiektowo-obserwowalnej sieci Petriego:

- każdemu stanowi, każdego obiektu systemu, określonemu jako gotowość do rozpoczęcia wykonywania czynności, odpowiada oddzielne miejsce w sieci, a jego oznakowanie określa dostępność danego obiektu w stanie reprezentowanym przez to miejsce,
- wszystkie czynności realizowane przez obiekty systemu reprezentowane są w modelu przez przejścia.

Spełnienie powyższych założeń zapewnia, że na każdym etapie pracy (bądź symulacji) systemu dostępne są informacje o obiektach, które mogą rozpocząć wykonywanie określonych czynności na polecenie centralnego układu sterowania, lub w wyniku wypracowanej decyzji na poziomie lokalnych układów sterowania.

Obiektowo-obserwowalną siecią Petriego OPN nazywa się szóstkę uporządkowaną OPN(P, T, F, W, M_0, J) taką, że:

a) $P \cap T = \emptyset$

b) $P \cup T \neq \emptyset$

c) $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$

d) $dom(F) \cup cod(F) = P \cup T$

e) $W: F \rightarrow N^+$

f) $M_0: P \rightarrow N$

g) $J: P \rightarrow N^+$

h) $\forall\, p_{a,j}: (p_{a,j}, t) \in F \;\; \exists\, p_{b,j}: (t, p_{b,j}) \in F$

i) $W(t, p_{b,j}) = W(p_{a,j}, t)$

W powyższej definicji następujące oznaczenia: *P* - zbiór miejsc, *T* - zbiór przejść, *F* - relacja przepływu, *W* - funkcja wagi, M_0 - funkcja oznakowania początkowego, są zgodne z konwencjami definiowania sieci Petriego [5], a ich własności przedstawione są w punktach *a) ÷ f)* powyższej definicji. Wprowadzona dodatkowa funkcja $J: P \rightarrow N^+$ jest funkcją numeracji obiektów. Funkcja ta przyporządkowuje każdemu miejscu $p \in P$ dodatnią liczbę naturalną, która jest interpretowana jako numer obiektu, którego stan dane miejsce reprezentuje. W związku z tym każde miejsce w sieci będzie posiadać dwa numery, np. $P_{k,l}$ oznacza miejsce reprezentujące stan *k* obiektu o numerze *l*, $(J(p_{k,l})=l)$. Można więc łatwo określić miejsca związane z danym obiektem, ponieważ posiadają one taką samą wartość funkcji *J*. Własności funkcji numeracji obiektów, a ściślej mówiąc ograniczenia nałożone za jej pomocą na miejsca w obiektowo-obserwowalnej sieci Petriego oraz funkcję wagi przedstawione są w punktach *h)* oraz *i)*. Punkt *h)* określa, że jeżeli miejsce *p* reprezentujące w sieci obiekt o numerze *j* w stanie a występuje w relacji przed przejściem t, to w relacji po przejściu t musi również występować miejsce reprezentujące ten sam obiekt j w stanie b, następującym po stanie a zgodnie z logiką działania obiektu j. Warunek *i)* powiada, że waga relacji związanej z miejscem odpowiadającym stanowi danego obiektu po przejściu t musi być równa wadze relacji związanej z miejscem odpowiadającym stanowi tego samego obiektu przed przejściem t. Warunek ten zapewnia niezmienną liczebność znaczników w sieci przed i po wzbudzeniu dowolnego przejścia t, co odpowiada własności fizycznej realności reprezentowanych przez znaczniki obiektów. W konsekwencji suma oznakowań wszystkich miejsc jest niezmiennikiem obiektowo-obserwowalnej sieci Petriego.

3. Obiektowo-obserwowalna czasowa sieć Petriego

Zgodnie z dokonanym założeniem czynności realizowane w systemie reprezentowane są w sieci za pomocą przejść. W obiektowo-obserwowalnej czasowej sieci Petriego każdemu przejściu przypisuje się czas trwania reprezentowanej przez niego czynności od zdarzenia będącego jej początkiem do zdarzenia odpowiadającego jej zakończeniu.

Obiektowo-obserwowalną czasową siecią Petriego TOPN nazywa się dwójkę uporządkowaną TOPN(OPN, τ), gdzie:

a) OPN jest obiektowo-obserwowalną siecią Petriego,

b) $\tau: T \rightarrow R$.

Funkcja τ przyporządkowuje każdemu przejściu $t \in T$ nieujemną liczbę rzeczywistą mającą znaczenie czasu trwania reprezentowanej przez niego czynności. Warunki wzbudzania przejść w obserwowalnej czasowej sieci Petriego oraz związane ze wzbudzaniem kolejnych przejść zmiany oznakowania sieci są zgodne z przedstawianymi w literaturze [3], [4] dla czasowych sieci Petriego, w których czas jest związany z przejściami. Parametrem branym pod uwagę przy analizie czasowej sieci Petriego jest czas bieżący T_c. Przejście t jest przygotowane, jeżeli spełniony jest warunek:

$$W(p, t) \leq M(p) \qquad \forall\ p : (p, t) \in F$$

Po uwzględnieniu, że oznakowanie M jest funkcją parametru T_c, powyższy warunek przyjmuje postać:

$$W(p, t) \leq M(p, T_c) \qquad \forall\ p : (p, t) \in F$$

Po wzbudzeniu przejścia t oznakowanie zmienia się dla wszystkich p występujących w powyższym warunku wg zależności:

$M^{t}(p, T_c) = M(p, T_c) - W(p, t)$

Przy wartości parametru $T_c^{t} = T_c + \tau(t)$ następuje powtórna zmiana oznakowania odpowiadająca zakończeniu wzbudzenia przejścia t.

$M(p, T_c^{t}) = M^{t}(p, T_c) + W(t, p)$

Z powyższych wzorów wynika, że zmiana oznakowania sieci odpowiadająca wzbudzeniu przejścia t odbywa się w dwóch etapach: w chwili wzbudzenia przejścia t przy wartości parametru T_c, kiedy to usuwane są znaczniki z miejsc wejściowych przejścia t w ilości określonej przez wartość funkcji $W(p, t)$, oraz ponownie po upływie czasu $\tau(t)$, gdy usunięte z miejsc wejściowych znaczniki są umieszczane w miejscach wyjściowych rozpatrywanego przejścia. W związku z powyższym stany obiektów biorących udział w czynności reprezentowanej przez przejście t nie są określone przez bieżące oznakowanie sieci w czasie $\tau(t)$ od momentu wzbudzenia przejścia t. Oznacza to niedostępność tych obiektów dla rozpoczęcia wykonywania jakichkolwiek innych czynności. Dodatkowo należy zaznaczyć, że pomiędzy zmianami oznakowania spowodowanymi wzbudzeniem przejścia t mogą zaistnieć warunki do wzbudzenia innych przejść, które mogą być wzbudzone w zależności od podjętych decyzji w tym zakresie.

Problem „znikania” znaczników na czas wzbudzenia przejścia mógłby zostać rozwiązany przez zastąpienie każdego przejścia reprezentującego czynność miejscami, które reprezentowałyby stany obiektów biorących udział w czynności, oraz parą przejść reprezentujących zdarzenia początku i końca czynności. Wówczas czas byłby związany z miejscami reprezentującymi stany obiektów biorących udział w czynności, a zmiany oznakowania związane ze wzbudzaniem przejść odbywałyby się natychmiastowo. Podejście takie powoduje jednak duży rozrost modelu spowodowany wzrostem liczby miejsc i przejść przy małym wzroście ilości informacji istotnych dla sterowania.

4. Reguły kolejności wzbudzania przejść w obiektowo-obserwowalnej sieci Petriego

Sformułowane powyżej warunki dotyczące wzbudzania przejść w danym momencie czasu nie są warunkami wystarczającymi do utworzenia jednoznacznego modelu sterowania zautomatyzowanego systemu wytwarzania. Utworzenie takiego modelu wymaga, oprócz określenia algorytmu wyznaczania przejść przygotowanych, podania reguły kolejności wzbudzania przejść spośród przejść przygotowanych. Reguła ta powinna odpowiadać stosowanemu sposobowi sterowania.

A. Sterowanie centralne

W tym przypadku reguła wyboru przejścia t, które ma być wzbudzone jako pierwsze spośród wszystkich przejść przygotowanych w systemie, jest zaimplementowana na poziomie centralnego układu sterowania. Reguła ta może wykorzystywać złożone algorytmy optymalizacyjne, może też być bardzo prosta, jak np. pierwszeństwo wzbudzenia przejścia o najniższym numerze. Bardzo często takie proste reguły, jak wykazano stosując sterowanie wg Modelu macierzowego [1] (model ten w działaniu jest równoważny sieci Petriego), są w pełni wystarczające, ponieważ pozwalają na efektywne wykorzystanie czasu maszynowego oraz terminową realizację zadań. Reguła ta powinna zawierać dodatkowe ograniczenia uniemożliwiające wystąpienie zastoju. Istnienie centralnej reguły określania kolejności wzbudzania przejść pozwala zarówno na symulację, jak i sterowanie systemem zautomatyzowanego wytwarzania.

B. Sterowanie przez poszczególne obiekty

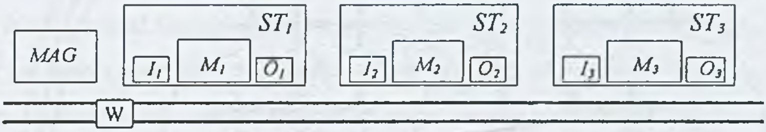
W tym przypadku funkcje centralnego układu sterowania przejmują, całkowicie lub częściowo, lokalne układy sterowania związane z wybranymi obiektami systemu. Dla każdego obiektu, który podejmuje funkcję sterowania, należy podać regułę wyboru przejścia, które ma być wzbudzone jako pierwsze. Nie jest to konieczne jedynie w najprostszych przypadkach, kiedy każdy obiekt może być gotowy do realizacji tylko jednej czynności.

C. Sterowanie samoorganizujące

Sterowanie to jest rodzajem sterowania przez poszczególne obiekty. W odróżnieniu jednak od sterowania określonego w punkcie B nie jest ono realizowane przez wybrane, pojedyncze obiekty systemu, lecz podejmowane działania są wynikiem współpracy obiektów biorących udział w tych działaniach. Koncepcja sterowania samoorganizującego została przedstawiona w pracy [2]. W sterowaniu takim nie wystarczają proste reguły wyboru przejść przez pojedyncze obiekty. Konieczne jest określenie reguł współdziałania poszczególnych obiektów w procesie podejmowania decyzji.

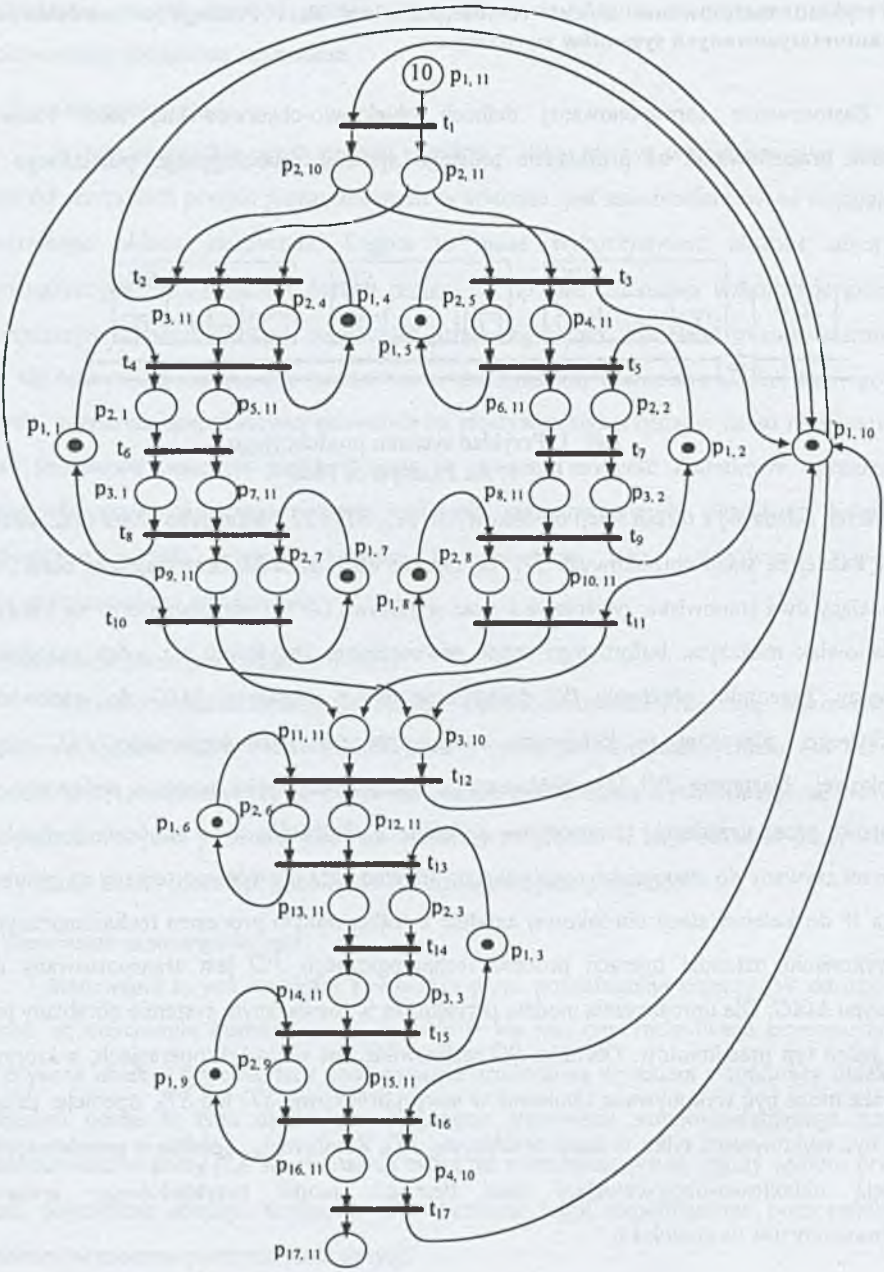
5. Przykład zastosowania obiektowo-obserwowalnej sieci Petriego w modelowaniu zautomatyzowanych systemów wytwarzania

Zastosowanie zaproponowanej definicji obiektowo-obserwowalnej sieci Petriego zostanie przedstawione na przykładzie prostego systemu produkcyjnego pokazanego na rysunku 1.



Rys. 1. Przykład systemu produkcyjego
Fig. 1. An Example of FMS

System ten składa się z trzech stacji obróbkowych: ST_1, ST_2 i ST_3, magazynu *MAG* oraz wózka *W*. W każdej ze stacji obróbkowych ST_i znajduje się obrabiarka M_i oraz magazyn buforowy posiadający dwa stanowiska: wejściowe I_i oraz wyjściowe O_i. Na obrabiarce oraz na każdym ze stanowisk magazynu buforowego może równocześnie znajdować się jeden przedmiot obrabiany. Przedmiot obrabiany *PO* dostarczany jest z magazynu *MAG* do stanowiska wejściowego, pierwszej w kolejności według procesu technologicznego *PO*, stacji obróbkowej. Następnie *PO* jest pobierany ze stanowiska wejściowego i podawany na obrabiarkę przez urządzenie transportowe związane z obrabiarką, a po skończonej obróbce jest przekazywany do stanowiska wyjściowego. Stamtąd *PO* jest transportowany za pomocą wózka *W* do kolejnej stacji obróbkowej zgodnie z realizowanym procesem technologicznym. Po wykonaniu ostatniej operacji procesu technologicznego *PO* jest transportowany do magazynu *MAG*. Dla uproszczenia modelu przyjęto, że w rozważanym systemie obrabiany jest tylko jeden typ przedmiotów. Obróbka *PO* realizowana jest w dwóch operacjach, z których pierwsza może być wykonywana zamiennie w stacji obróbkowej ST_1 lub ST_2, operacja druga może być wykonywana tylko w stacji obróbkowej ST_3. Zbudowany, zgodnie z przedstawioną definicją obiektowo-obserwowalnej sieci Petriego, model przykładowego systemu przedstawiony jest na rysunku 2.



Rys. 2. Obiektowo-obserwowalna sieć Petriego dla rozważanego systemu produkcyjnego

Fig. 2. Object-observable Petri net for presented FMS

W tak zbudowanym modelu dostępne są w sposób bezpośredni, w postaci oznakowania odpowiednich miejsc, informacje o gotowości poszczególnych obiektów systemu do rozpoczęcia wykonywania czynności. Dostępność tych informacji jest zapewniona przez to, że każdy stan gotowości do wykonania czynności dla każdego obiektu systemu jest reprezentowany przez oddzielne miejsce w sieci. Oznakowanie miejsc związanych z danym obiektem określa, do rozpoczęcia jakiej czynności obiekt jest gotowy na danym etapie pracy systemu. Jeżeli wartość funkcji oznakowania $M(p)$ dla każdego miejsca związanego z danym obiektem jest równa zero, wówczas obiekt ten jest w trakcie realizacji czynności, co oznacza, że jest on niedostępny do rozpoczęcia jakiejkolwiek innej czynności. W przedstawionej na rys. 2 sieci miejsca $p_{1,1}$, $p_{2,1}$, $p_{3,1}$ reprezentują możliwe stany gotowości do rozpoczęcia wykonywania czynności dla obrabiarki M_1. Występowanie znacznika w miejscu $p_{1,1}$ oznacza, że aktualnie obrabiarka M_1 jest w stanie gotowości do wykonania czynności: pobranie *PO* ze stanowiska I_1, reprezentowanej przez przejście t_4. Po zaistnieniu warunków umożliwiających wzbudzenie przejścia t_4 i w konsekwencji jego wzbudzeniu w czasie trwania czynności reprezentowanej przez to przejście oznakowanie każdego z miejsc $p_{1,1}$, $p_{2,1}$, $p_{3,1}$ będzie równe zeru co oznacza, że obrabiarka M_1 jest zajęta. Możliwe jest określenie czynności, w której obrabiarka M_1 uczestniczy na podstawie znajomości jej poprzedniego stanu.

6. Podsumowanie

Model systemu produkcyjnego zbudowany za pomocą sieci Petriego w oparciu o zasady przedstawione w rozdziale 2 może być wykorzystany do realizacji zarówno sterowania centralnego, jak i sterowania rozproszonego. Obiektowo-obserwowalną sieć Petriego opisującą cały system produkcyjny można w łatwy sposób podzielić na części składowe odpowiadające poszczególnym obiektom systemu. Sieć Petriego odpowiadająca danemu obiektowi systemu może być utworzona przez wydzielenie, z sieci Petriego opisującej cały system, podsieci składającej się z miejsc związanych z rozpatrywanym obiektem, oraz przejść reprezentujących czynności, w wykonywaniu których obiekt uczestniczy. Utworzone w ten sposób sieci opisują cykle pracy stałych obiektów systemu lub przedstawiają przepływ obiektów przez system. Uzupełnienie uzyskanych w powyższy sposób sieci, opisujących zachowanie pojedynczych obiektów systemu, o zasady komunikacji pomiędzy poszczególnymi składnikami modelu oraz dołączenie reguł określających kolejność wzbudzanych przejść, przedstawionych w zarysie w rozdziale 4, prowadzi do uzyskania modelu rozproszonego.

LIRERATURA

1. Cyklis J., Pierzchała W.: Modelowanie procesów dyskretnych w elastycznych systemach produkcyjnych. Politechnika Krakowska, nr 3, Kraków 1995.
2. Cyklis J., Zając J.: Od centralizmu do autonomii w sterowaniu dyskretnymi systemami wytwarzania. W materiałach z XI KKADPP.
3. Lee Doo. Yong, DiCesare F.: Petri Net-Based Heuristic Scheduling for Flexible Manufacturing, Petri Nets in Flexible and Agile Manufacturing Systems, Kluwer Academic Publisher Boston/Dordrecht/London 1995, s. 149-187.
4. Li Shifang, Takamori Toshi, Tadokoro Satoshi: Scheduling and Rescheduling of AGVs for Flexible and Agile Manufacturing, Petri Nets in Flexible and Agile Manufacturing Systems, Kluwer Academic Publisher Boston/Dordrecht/London 1995, s. 189-205.
5. Starke P. H.: Sieci Petri (tłum. Z jęz. Niemieckiego), PWN, Warszawa 1987.

Recenzent: Dr hab.inż.Jan Kałuski, prof.Pol.Śl.

Abstract

Petri nets are often used in modeling Flexible Manufacturing Systems (FMS). They feature graphical representation and provide simple ways to make analysis of the model. Places in classical Petri net may represent either individual object or group of objects. It causes some difficulties to get direct information about the current state of the particular objects. In proposed approach places in the net are prevented from representation of multiple objects. The definition of the object-observable Petri net (OPN) is based on the definition of Petri net by adding a J function called objects' numeration function. By means of this function additional constraints for the flow relation F and the weight function W has been added. In the FMS model based on OPN each place can be associated only with one object of the modeled system. Places associated with given object represent its states interpreted as a readiness to take part in an activity. Activities performed in the system are represented by transitions. If a place p representing a state of a given object is an input place for transition t there must be an output place after transition t associated with the same object. Additionally the value of the weight function must be the same respectively for input and output arcs connecting places, which represent the same object, with given transition. Timed object-observable Petri net (TOPN) is defined as OPN with time associated with transitions. FMS model based on proposed definition of OPN gives clear description how particular objects act in the system. There is a simple way to determine whether a given object is ready to take part in a given activity by checking marking of places associated with considered object. Additionally the model of the

whole system may be easily broken down into sub-nets corresponding particular system resources or work pieces flowing through the system. Those features of the model are essential when distributed control is to be introduced.