Lesław GNIEWEK
POLITECHNIKA RZESZOWSKA, KATEDRA INFORMATYKI I AUTOMATYKI

Rozmyta interpretowana sieć Petriego jako układ sterowania

dr inż. Lesław GNIEWEK

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Rzeszowskiej (specjalność automatyka i metrologia). Od 1991 r. zatrudniony w Politechnice Rzeszowskiej. W 1999 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na Wydziale Informatyki i Zarządzania Politechniki Wrocławskiej. Obecnie adiunkt w Politechnice Rzeszowskiej w Katedrze Informatyki i Automatyki. Jego publikacje dotyczą projektowania sprzętu cyfrowego, logiki rozmytej, sieci Petriego i programowalnych sterowników logicznych.

e-mail: : lgniewek@prz-rzeszow.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono nową koncepcję rozmytej interpretowanej sieci Petriego. Podano podstawowe definicje opisujące jej budowę i działanie. Zaprezentowano graficzną i algebraiczną reprezentację sieci. Zamieszczono przykład obrazujący wykorzystanie rozmytej interpretowanej sieci Petriego do monitorowania i sterowania stacji przeładunkowej materiału sypkiego. Zaproponowana sieć jako układ sterowania umożliwia uwzględnienie zarówno sygnałów analogowych, jak i binarnych oraz pozwala na ilościowe modelowanie zasobów.

Słowa kluczowe: logika rozmyta, modelowanie, sieci Petriego, układy sterowania.

Fuzzy interpreted Petri net as control system

Abstract

This paper presents a new concept of fuzzy interpreted Petri net, which is an extension of the net suggested in [3], [4]. It combines advantages of the interpreted Petri nets, which have been applied in logic controllers programming (Grafcet, SFC) and fuzzy Petri nets, whose functioning based on multivalued logic allows to use analog signals. It also introduces fundamental definitions describing the construction and functioning of fuzzy interpreted Petri net. Two types of places have been introduced. The places which can store only one fuzzy token are associated with control signals. The places which can store a larger number of tokens are meant for monitoring resource and their application. Weights attributed to arcs allow to move groups of tokens. This lets monitor the position of not only single elements but also multielement portions of material. The paper defines algebraic representation of the net, which can be used to the analysis of its some properties. It also shows an example presenting the application of fuzzy interpreted Petri net to monitor and control of loading a loose material station. On the basis of this example the algebraic and graphic representation of the net has been pictured. In this way it has been shown that fuzzy interpreted Petri net as the control system allows to respect both analog and binary signals as well as quantity modelling of resources.

Keywords: fuzzy logic, modelling, Petri nets, control systems.

1. Wstęp

Jednym z obszarów zastosowań interpretowanych sieci Petriego jest programowanie sterowników PLC, służących do sterowania sekwencyjnego w systemach produkcyjnych, co zostało najpierw sformalizowane w formie standardu Grafcet, a później jako Sekwencyjny Diagram Funkcyjny (SFC). Sieci te doczekały się również implementacji sprzętowej z wykorzystaniem struktur FPGA. Na przykład w [1] zaproponowano wykorzystanie sieci opisanej w [2] jako formalnego modelu użytego przy projektowaniu sprzętowych sterowników opartych na technologii FPGA.

W [3,4] zaproponowano rozmytą sieć Petriego, w której (podobnie jak w interpretowanych sieciach Petriego) odpalenie tranzycji synchronizowane jest zdarzeniami zewnętrznymi, miejsca związane są z pewnymi działaniami, a zmiana rozkładu znaczników odpowiada zmianom zachodzącym w modelowanym systemie. W sieci tej rolę rozmytych znaczników pełnią liczby z przedziału [0,1], co umożliwia uwzględnienie dokładniejszej informacji o stanie systemu (pochodzącej np. z czujników analogowych). W [5] pokazano efekty programowej implementacji tej sieci w sterownikach PLC, a w [6,7] jej sprzętową realizację za pomocą struktur FPGA. Sieć ta posiada jednak znaczne ograniczenia w postaci jednostkowej pojemności miejsc i jednostkowej przepustowości łuków.

W dalszej części pracy zostaną przedstawione formalne podstawy rozmytej interpretowanej sieci Petriego, która jest pewnym rozszerzeniem sieci opisanej w [3,4]. Sieć ta umożliwiać będzie przemieszczanie grupy rozmytych znaczników poprzez przypisanie wag do łuków oraz przechowywanie większej liczby znaczników w miejscach. Przedstawiony będzie również przykład obrazujący działanie tej sieci jako układu sterowania stacji przeładunkowej materiału sypkiego. W ten sposób rozszerzona zostanie możliwość wykorzystania sieci Petriego w układach sterowania i monitorowania.

2. Rozmyta interpretowana sieć Petriego

W tym rozdziale podane zostaną formalne podstawy nowej koncepcji sieci.

Definicja 1
Rozmytą interpretowaną sieć Petriego jest jedenastką:

$$FIPN = (P, T, D, G, R, \Delta, K, W, \Gamma, \Theta, M_0), \tag{1}$$

gdzie: $P = P' \cup P''$ *- zbiór miejsc;* $P' = \{p'_1, p'_2, ..., p'_a\}$ *- zbiór miejsc związanych z modelowaniem działań lub procesów;* $P'' = \{p''_1, p''_2, ..., p''_b\}$ *- zbiór miejsc związanych z modelowaniem zasobów;* $T = \{t_1, ..., t_s\}$ *- niepusty, skończony zbiór tranzycji;* $D = \{d_1, ..., d_r\}$ *- niepusty, skończony zbiór stwierdzeń czy działań;* $G = \{g_1, ..., g_s\}$ *- niepusty, skończony zbiór warunków; P, T, D, G - zbiory parami rozłączne;* $R \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ *- relacja incydencji, która dla każdej tranzycji* $t_i \in T$, $i = 1,2,...,s$, *spełnia następujące warunki:* $((p'', t_i) \in R \Rightarrow (t_i, p'') \notin R)$ *i* $((t_i, p'') \in R \Rightarrow (p'', t_i) \notin R)$ *;* Δ*:* $P \to D$ *- funkcja przypisująca każdemu miejscu stwierdzenie czy działanie;* $K : P' \to 1$ i $P'' \to N \backslash \{1\}$ *- funkcja przypisująca każdemu miejscu pojemność, gdzie* $N = \{1,2,\ldots\}$*;* Γ*:* $T \to G$ *- funkcja przypisująca każdej tranzycji warunek;* Θ*:* $T \to [0,1]$ *- funkcja określająca stopień spełnienia warunków związanych z tranzycjami t;* $W: R \to N$ *- funkcja wagowa spełniająca dwa warunki:* $W(p,t) \le K(p)$ *i* $W(t,p) \le K(p)$ *(w skrócie p oznacza p' lub p");* M_0*:* $P \to \frac{z}{K}$, *gdzie* $z \in N \cup \{0\}$ *i* $z \le K$ *- funkcja znakowania początkowego.*

Aby nie zatracić przejrzystej interpretacji przemieszczania rozmytych znaczników, w definicji sieci zapisano, że w chwili początkowej w miejscach *p*' znaczniki są „nierozmyte" („są w stopniu 1" lub „są w stopniu 0"), a znaczniki w miejscach *p*" są wielokrotnością przypisanego im współczynnika normalizacji $1/K$ lub zerem. Ponadto założono, że miejsca $p'' \in P''$ nie mogą sąsiadować ze sobą, tzn. jeżeli miejsce *p*" jest miejscem wejściowym tranzycji *t*, to żadne miejsce wyjściowe tej tranzycja nie może być miejscem typu *p*". Analogicznie, jeżeli miejsce $p'' \in P''$ jest miejscem wyjściowym tranzycja *t*, to żadne miejsce wejściowe tej tranzycja nie może być miejsce tego typu.

Dynamika sieci. Koncesję na uaktywnienie tranzycja otrzymuje w zależności od wartości znakowania jej miejsc wejściowych i wyjściowych.

Definicja 2

Tranzycja $t \in T$ *jest przygotowana do uaktywnienia (ma koncesję) dla znakowania M: P* $\rightarrow [0,1]$ *od momentu, gdy spełnione są warunki:*

$$\forall p \in {}^{\bullet}t, M(p) \geq \frac{W(p,t)}{K(p)} \quad i \ \forall p \in t^{\bullet}, M(p) \leq \frac{K(p)-W(t,p)}{K(p)} \quad (2)$$

do momentu, gdy:

$$\forall p' \in {}^{\bullet}t, M(p) = 0 \qquad i \qquad \forall p' \in t^{\bullet}, M(p) = 1, \qquad (3)$$

gdzie: •t = {p∈P | (p,t)∈R} oznacza zbiór miejsc wejściowych tranzycji t, a t• = {p∈P | (t,p)∈R} - zbiór jej miejsc wyjściowych.

Czas aktywności tranzycji zależy od szybkości zmian warunku związanego z tą tranzycją. Sposób wyznaczania nowego znakowania sieci opisuje Definicja 3.

Definicja 3

Jeżeli dla znakowania M tranzycja $t \in T$ *jest przygotowana do uaktywnienia, a stopień spełnienia warunku związanego z przygotowaną tranzycją* $\Theta(t) = \vartheta \in [0,1]$ *zwiększy się o* $\Delta\vartheta > 0$ *, to nowe znakowanie sieci M' można wyznaczyć za pomocą następującej reguły:*

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) - \Delta\vartheta \cdot \dfrac{W(p,t)}{K(p)} & \Leftrightarrow \quad p \in {}^{\bullet}t, \\ M(p) + \Delta\vartheta \cdot \dfrac{W(t,p)}{K(p)} & \Leftrightarrow \quad p \in t^{\bullet}, \\ M(p) & \Leftrightarrow \quad p \notin {}^{\bullet}t \cup t^{\bullet}. \end{cases} \qquad (4)$$

Reprezentacja algebraiczna

Do analizy rozmytej interpretowanej sieci Petriego można zastosować jej reprezentację algebraiczna opartą na klasycznej macierzy incydencji *C*. Wówczas znakowanie następnicze tej sieci można wyznaczyć wykorzystując poniższe twierdzenie.

Twierdzenie 1

Jeżeli w rozmytej interpretowanej sieci Petriego dla znakowania M zostaną uaktywnione tranzycje, które według Definicji 2 są przygotowane do uaktywnienia, to znakowanie następnicze M', które wystąpi w wyniku uaktywnienia tych tranzycji jest opisane zależnością:

$$M' = M + [(E \wedge \Theta) \cdot C] / K \ , \qquad (5)$$

gdzie:

E - wektor zerojedynkowy o wymiarze $1 \times s$ *, w którym numer współrzędnej równej 1 odpowiada indeksowi tranzycji aktualnie przygotowanej w znakowaniu M,*

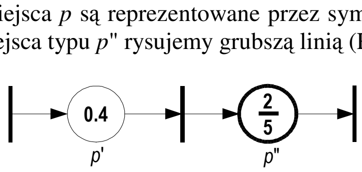
Θ - wektor o wymiarze $1 \times s$ *, w którym współrzędna* ϑ_i*, i = 1, 2, … , s opisuje przyrost stopienia spełnienia warunku związanego z tranzycją* t_i*,*

K – wektor o wymiarze $1 \times (a+b)$ *przypisujący każdemu miejscu pojemność,* $K(p) \in N$

$\wedge$ *- operacja minimum.*

Reprezentacja graficzna

W formie graficznej, wykorzystywanej głównie do wizualizacji stanu sieci, miejsca *p* są reprezentowane przez symbol okręgu O, przy czym miejsca typu *p*" rysujemy grubszą linią (Rys. 1).

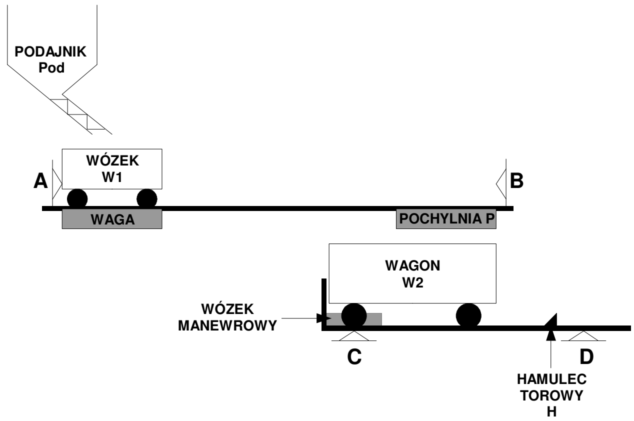


Rys. 1. Reprezentacja graficzna sieci.
Fig. 1. The graphic representation of the net.

Znakowanie miejsc przedstawiamy w formie liczby ułamkowej, w której mianownik opisuje pojemność miejsca, a licznik liczbę znaczników znajdujących się w miejscu. W miejscach typu *p*' pomijamy mianownik, gdyż pojemność tych miejsc z definicji jest równa jeden. Znakowanie $M(p") = 2/5 = 0.4$ oznacza, że w miejscu *p*" o pojemności *K*(*p*")=5 znajdują się 2 znaczniki. Gdyby $M(p") = 2.8/5 = 0.56$, to oznaczałoby to, że w miejscu *p*" znajdują się dwa znaczniki w stopniu 1 i jeden znacznik w stopniu 0.8.

3. Przykład

Rozpatrzmy układ załadunku wagonu W2, w którym wykorzystywany jest wózek W1 (Rys. 2).



Rys. 2. Stacja przeładunkowa materiału sypkiego.
Fig. 2. The loading a loose material station.

Wózek W1 stoi w punkcie A, gdzie zostaje załadowany materiałem sypkim poprzez uruchomienie podajnika Pod. Waga podaje informację o stopniu załadowania wózka. Gdy wózek W1 jest pełny, wówczas przemieszcza się do punktu B, gdzie zatrzymuje się i czaka na przeładowanie materiału do wagonu W2. Po rozładowaniu powraca ponownie do punktu A, a proces załadunku i przemieszczania się wózka W1 ponownie się powtarza. Z drugiej strony wagon W2 zostaje przyprowadzony przez wózek manewrowy do punktu C, gdzie oczekując na załadunek. Gdy wózek manewrowy osiągnie ten punkt załączany jest hamulec torowy H, który uniemożliwia opuszczenie przez wagon punktu załadunkowego. Wagon W2 ma pojemność 3 razy większą od wózka W1 i jego napełnienie wymaga dostarczenia 3 porcji materiału sypkiego, które może pomieścić wózek W1. Gdy wagon W2 zostanie załadowany, wówczas hamulec torowy H zostaje zwolniony i wózek manewrowy może odprowadzić wagon poza punkt przeładunkowy, a jego opuszczenie sygnalizuje czujnik D. Po przyjeździe kolejnego wagonu do punktu C ponownie zostaje załączony hamulec torowy i proces załadunku powtarza się. Dla uproszczenia przykładu pominięto sterowanie wózkiem manewrowym, który jest odpowiedzialny nie tylko za przyprowadzenie i odprowadzenie wagonu do punktu załadunkowego, ale również za jego przesuwanie podczas załadunku pomiędzy punktem C a punktem zamontowania hamulca torowego tak, aby kolejne porcje przesypywanego materiału były równomiernie rozmieszczone w wagonie W2.

Na Rys. 3 przedstawiono sieć modelującą układ załadunku wagonu. Miejscom sieci typu *p*' przyporządkowano sygnały sterujące, które oznaczono następująco:

$W1_P$, $W1_L$, $W1_S$ - ruch wózka W1 (odpowiednio w prawo, w lewo lub stop),

P - załączenie pochylni (~P - wyłączenie pochylni),

Pod - załączenie podajnika (~Pod - wyłączenie podajnika),

H - załączenie hamulca torowego (~H - wyłączenie hamulca),

a tranzycjom *t* przypisano sygnały pochodzące od czujników:

A, B - czujniki położenia wózka,

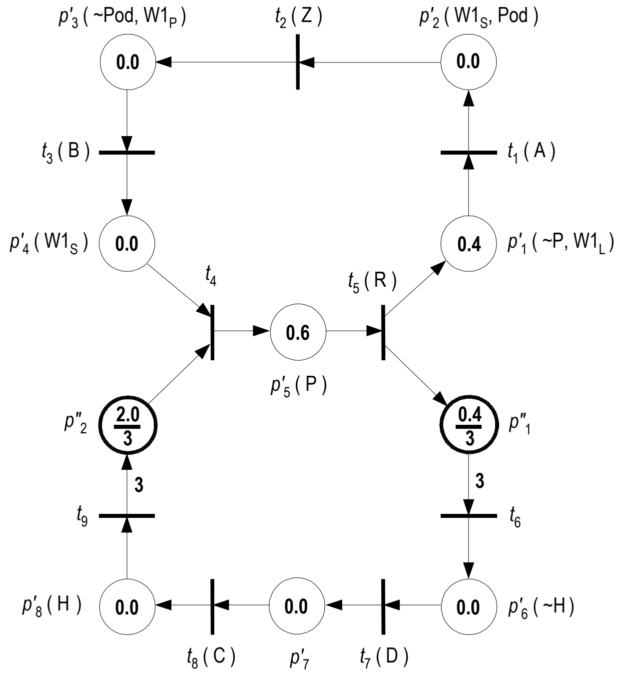
C, D - czujniki położenia wózka manewrowego,

R - postęp w rozładunku wózka W1,

Z - postęp w załadunku wózka W1.

Sygnał sterujący związany z miejscem *p*' jest wystawiany od chwili, gdy w miejscu tym znajduje się znacznik w stopniu 1

($M(p')$=1) do momentu, gdy znacznik ten zostanie całkowicie usunięty ($M(p')$=0).



Rys. 3. Rozmyta interpretowana sieć Petriego modelująca układ załadunku.
Fig. 3. The fuzzy interpreted Petri net model of the loading system.

Rozmyta interpretowana sieć Petriego umożliwia zastosowanie zarówno czujników binarnych, jak i analogowych, których sygnał należy normalizować do przedziału [0,1]. Jeżeli czujnik analogowy będzie określać położenie wózka W1 pomiędzy punktami A i B, to będzie można obserwować „przelewanie się" znacznika przez tranzycje t_1 i t_3. Jeżeli czujniki analogowe będą monitorować stopień załadunku i rozładunku wózka W1, to będzie można również zobaczyć „przelewanie się" znacznika przez tranzycie t_2 i t_5.

Sieć z Rys. 3 posiada dwa miejsca typu p''. Znakowanie miejsca p_1'' opisuje ile materiału sypkiego jest już w wagonie. Znakowanie $M(p_1'') = 0.4/3$ oznacza, że przesypano z wózka W1 do wagonu W2 40% materiału (trwa proces rozładowywania tego wózka). Miejsce p_1'' pełni więc rolę rozmytego licznika, który pokazuje stopień załadunku wagonu W2. Ponieważ przepustowość łuku prowadzącego od tego miejsca wynosi 3, to do odpalenia tranzycji t_6 potrzebne jest znakowanie $M(p_1'') = 3.0/3$, czyli załadowanie zawartości 3 wózków W1. Ponieważ tranzycie t_4 i t_9 są tranzycjami bezwarunkowymi, to znakowanie miejsca p_2'' może przyjmować wartości 3.0/3, 2.0/3, 1.0/3 lub 0.0/3 i będzie podawać liczbę wózków W1, które powinny dostarczyć materiał do miejsca przeładunku.

Sieć z Rys. 3 możemy opisać poprzez macierz incydencji C:

$$
\begin{array}{c} \\ t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ C = t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccccccc} p'_1 & p'_2 & p'_3 & p'_4 & p'_5 & p'_6 & p'_7 & p'_8 & p''_1 & p''_2 \end{array} \\
\begin{bmatrix}
-1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\
1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -3 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 3
\end{bmatrix}
\end{array} \qquad (6)
$$

Wektor M opisujący znakowanie sieci z Rys. 3 ma postać:

$$M = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0 & 0 & 0 & \frac{0.4}{3} & \frac{2.0}{3} \end{bmatrix}. \qquad (7)$$

Wszystkie miejsca typu p' mają pojemność $K(p')$=1, więc wektor K zapisujemy jako:

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 \end{bmatrix}. \qquad (8)$$

Dla rozkładu znaczników jak na Rys. 3 aktywna jest tylko tranzycja t_5, dlatego też wektor E przyjmuje postać:

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \qquad (9)$$

Załóżmy, że przesypano do wagonu W2 kolejne 5% zawartości wózka W1. Wówczas wektor Θ przyjmuje postać:

$$\theta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.05 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \qquad (10)$$

Korzystając z Twierdzenia 1 możemy obliczyć wektor M':

$$M' = \begin{bmatrix} 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0.55 & 0 & 0 & 0 & \frac{0.45}{3} & \frac{2.0}{3} \end{bmatrix}. \qquad (11)$$

Obserwujmy więc dalszy postęp w „przelewaniu się" znacznika pomiędzy miejscem p'_5, a miejscami p'_1 i p''_1. zgodny z postępem w przeładunku materiału.

4. Wnioski

W pracy przedstawiono koncepcję rozmytej interpretowanej sieci Petriego, która rozszerza możliwości sieci zaproponowanej w [3] o modelowanie ilościowe zasobów. Podano przykład algorytmu sterowania opisanego za pomocą tej sieci oraz jej algebraiczną reprezentację. W ten sposób pokazano możliwość zastosowania tej sieci w układach sterowania, gdy z obiektu zbierane są zarówno sygnały analogowe, jak i binarne. Dalsze prace będą zmierzały do opracowania metody syntezy te sieci z wykorzystaniem rozmytych układów kombinacyjnych i sekwencyjnych. Skłania do tego ciągły rozwój „sprzętu rozmytego" [8,9], [10], [11], jak i dotychczas opracowane metody syntezy rozmytej sieci Petriego [3,5].

Praca naukowa częściowo finansowana ze środków na naukę w latach 2008 - 2010 jako projekt badawczy N N514 413934.

5. Literatura

[1] M. Adamski, Z. Skowroński: Interpretowane sieci Petriego – model formalny w zintegrowanym projektowaniu mikroprocesorowych systemów sprzętowo-programowych, Pomiary Automatyka Kontrola, nr 2/3, 2003

[2] R. David, H. Alla: Petri Nets for Modeling of Dynamic Systems – A Survey, Automatica, vol. 30, no. 2, 1994.

[3] L. Gniewek, J. Kluska: Hardware implementation of fuzzy Petri net as a controller, IEEE Trans. on Syst., Man and Cybern. - Part B: Cybernetics, vol.34, no.3, June 2004.

[4] J. Kluska, L. Gniewek: Fuzzy Petri nets as control systems, Pomiary Automatyka Kontrola, nr 1, 2005.

[5] J. Kluska, L. Gniewek: A new method of fuzzy Petri net synthesis and its application for fuzzy control systems design, Advances in Soft Computing, Physica-Verlag Heidelberg, 2000.

[6] J. Kluska, Z. Hajduk: Hardware implementation of a fuzzy Petri net based on VLSI digital circuit, Third Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology EUSFLAT, Zittau, Germany, 2003.

[7] J. Kluska, Z. Hajduk: Digital Implementation of Fuzzy Petri Net Based on Asynchronous Fuzzy RS Flip-Flop, 7th Int. Conf., Artificial Intelligence and Soft Computing - ICAISC, 314-319, Zakopane, 2004.

[8] K. Hirota, K. Ozawa: The concept of fuzzy flip-flop, IEEE Trans. on Syst., Man and Cybern., vol. 19, 1989.

[9] L. Gniewek, J. Kluska: Family of fuzzy J-K flip-flops based on bounded product, bounded sum and complementation, IEEE Trans. on Syst., Man and Cybern. - Part B: Cybernetics, vol. 28, no 6, 1998.

[10] S. Yoshida, K. Hirota: Lattice Structure of D, T, and SR Fuzzy Flip-Flops Under Max_Min Logic, Jounral of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, vol. 9, no 6, 2005.

[11] R. Lovassy, L.T. Koczy, L. Gal: Multilayer Perceptron Imlemented by Fuzzy Flip-Flops, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ 2008.

Artykuł recenzowany