

Литература

1. Deep Neural Networks for YouTube Recommendations. URL: <http://static.googleusercontent.com/media/research.google.com/ru//pubs/archive/45530.pdf> (Дата обращения 22.03.2019)

2. Рябова А. А., Липовая Т. Б. Применение INTERNET-технологий в интеллектуальных информационных системах // Современные методы интеллектуального анализа данных в экономических, гуманитарных и естественно-научных исследованиях: Материалы Международной научно-практической конференции. Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова, филиал в г. Пятигорске Ставропольского края. Пятигорск, 2016. С. 80–86.

УДК 519.95

МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕГРИРОВАННЫХ РАСКРАШЕННОСТОХАСТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ НА БАЗЕ CPNTools

Гусейнзаде Ш. С., канд. техн. наук, доцент,
shahla.huseynzade@gmail.com

Сумгаитский государственный университет,
г. Сумгаит, Республика Азербайджан

Аннотация. В статье вводятся расширения структуры стохастических сетей Петри (ССП) для удобства решения конкретных задач моделирования интеллектуального управления динамическими системами. Описаны наиболее распространенные классы СПП, проведено их сравнение и определены недостатки. Недостатком является то, что не учитывается совместимость множества параметров и характеристик, которые отражают вероятностные показатели структурных компонент, таких как функции инцидентностей, позиции, переходы, маркировки и дуги. Эти недостатки существенно ограничивают возможности исследователя. С целью преодоления этих проблем ниже сформирована интегрированная СПП на основе представленных типов. Разработан алгоритм функционирования интегрированной СПП. С целью качественного анализа процесса и интерпретирования динамики меток, в представленную интегрированную СПП введена возможность построения раскрашенной структуры: функция цвета, емкость

маркеров в позициях с учетом цветов. На примере функционирования технической системы разработана интегрированная раскрашенная стохастическая сеть Петри (РССП), – модель процесса возникновения и устранения неисправностей в виде графа ССП на CPNTools. На основе известных статистических данных об интенсивностях возникновения отказов и длительностях операций поиска неисправностей, замены и ремонта отказавшего блока, сформированы структурные элементы СП со стохастическими и раскрашенными параметрами. При компьютерной реализации алгоритма получена последовательность срабатываемых переходов на изменения маркировки графа. Модель интегрированной РССП разрешает конфликтные ситуации и предотвращает тупиковые состояния.

Ключевые слова: стохастические сети Петри; вероятность маркировок; множество переходов; раскрашенные сети Петри; функции инцидентностей; начальная маркировка; тупиковые ситуации.

MODELLING WITH THE APPLICATION OF INTEGRATED COLORED STOCHASTIC PETRI NETS BASED ON CPN Tools

Huseynzade Sh. S.

Abstract. *The article introduces extensions of the structure of stochastic Petri net (SPN) for the convenience of solving specific problems of intelligent control modeling of dynamic systems. The most common classes of SPN are described, compared and deficiencies are identified. The disadvantage is that there is not taken into account the compatibility of the set of parameters and characteristics, which reflect probabilistic indicators of structural components, such as incidence functions, positions, transitions, markings and arcs. These shortcomings significantly limit the ability of the researcher. In order to overcome these problems, an integrated SPN was formed on the basis of the types presented. The algorithm of functioning of the integrated SPN is developed.*

Using the example of a module in a flexible production system, a model has been developed for the process of occurrence and elimination of faults in a technical system in the form of a PN graph.

The algorithm of functioning of the integrated SPN is developed. In order to qualitatively analyze the process and interpret the dynamics of tags, the possibility of constructing a colored structure is introduced into the presented integrated SPN: the function of color, the capacity of markers

in the positions with regard to colors. Using the example of the functioning of a technical system, there has been developed a model of the process of emergence and elimination of faults in the form integrated colored stochastic Petri net (CSPN) of a graph of PN on CPN Tools. On the basis of known statistics on failure rates and durations of troubleshooting operations, replacement and repair of a failed unit, structural elements of the PN with stochastic parameters are formed. With the computer implementation of the algorithm, a sequence of triggered transitions and changes in the marking of the graph are obtained. The integrated CSPN model resolves conflict situations and prevents dead-end states.

Keywords: *stochastic Petri net; labeling probability; the set of transitions; colored Petri net; incidence functions; initial labeling; dead-end states.*

Введение

В теории моделирования систем имеют место исследования стохастических процессов, степень неопределенности которых, с течением времени может изменяться. В таких случаях принимаются некоторые предположения к условиям функционирования данных процессов, в которых допускаются некоторые потенциально присутствующие ошибки в количественной оценке вероятности событий.

Путем взаимодействия различных видов специальных сетей Петри образуются комбинированные сети Петри (СП). Они отличаются наибольшей сложностью, обладая характеристиками всех своих «родителей», интегрируют их возможности. В частности, интегрированная РССП, являясь комбинацией раскрашенных и стохастических СП, обладает преимуществами и тех, и других [1].

Аппарат ССП позволяет построить модель интеллектуального управления динамических систем, в которой на структуру накладываются стохастические параметры и логические условия взаимодействия процессов. Отдельным структурным элементам, таким как позиции, переходы, дуги, маркеры можно присвоить стохастические параметры. В том числе переходам ССП сопоставляются условные вероятности их срабатывания.

В настоящее время имеется много расширений ССП. Например, разработаны ССП с непрерывным и дискретным временем, разными типами временных задержек переходов, приоритетами и ингибиторными дугами [2, 3]. Так, определен класс обобщенных ССП с экспоненциально распределенной задержкой. Время может располагаться в позициях, метках, дугах и/или переходах.

Для SimNet время срабатывания устанавливается в соответствующий переход [4]. Имеются также другие расширения структуры и поведения ССП для удобства решения конкретных задач моделирования.

Стохастические сети Петри определяются парой $M_s = (c, \mu^s)$, где $c = (P, T, I, O)$ описывает структуру сети, а отображение $\mu^s : P \rightarrow V_s = [0, 1]$ присваивает каждой позиции вероятностей наличия фишек $\mu^s(p_i)$ [5]. В этой разработке заданы вероятностные показатели маркировок. Недостатком этой разработки является то, что не учитываются вероятностные показатели структурных компонент, таких как позиции, переходы, дуги.

В непрерывно-временной ССП, заданной пятеркой $N = (P, T, W, \Omega, M)$, переходам присвоены $\Omega: T \rightarrow IR_+$ – функции темпов переходов [6]. В этой разработке заданы вероятностные показатели переходов. Недостатком этой разработки является то, что не учитываются вероятностные показатели маркировок, позиций, дуг.

В существующих модификациях ССП стохастические параметры одновременно применены только к одному из структурных элементов, что существенно ограничивает возможности исследователя. Учитывая сложность реальных систем, параллелизм процессов, взаимные синхронизации и блокировки и множество вероятностных параметров, появляется необходимость расширения выразительных средств моделирования, что делает необходимым разработку новых интегрированных ССП и усовершенствование существующих, в которых стохастические параметры одновременно применены к нескольким структурным элементам.

Представление интегрированных ССП

В настоящей работе представляется разработанная модификация, приводящая к интеграции вышепоказанных видов ССП, в которой стохастические параметры применены к двум структурным элементам одновременно: к переходам и к маркерам в позициях. Модификация названа как интегрированная ССП и сформирована нижеследующим образом: интегрированная стохастическая сеть Петри определяется пятеркой

$$N_s^I = (P, T, W, \Omega, \mu^s),$$

где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $n > 0$ – конечное непустое множество позиций;
 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, $m > 0$ – конечное непустое множество переходов;

$W : (P \times T) \cup (T \times P) \rightarrow N$ – функция весов дуг между позициями и переходами, и наоборот (N – натуральные числа);

$I : P \times T \rightarrow (0, 1, \dots)$; $O : T \times P \rightarrow (0, 1, \dots)$ – соответственно функции входных и выходных вмешательств);

$\Omega : T \rightarrow IR_+$ – функция темпов переходов ($IR_+ = [0; \infty)$ – непрерывная временная шкала);

отображение $\mu^s : P \rightarrow V_s = [0, 1]$ присваивает каждой позиции вектор распределения вероятностей наличия фишек $\mu^s(p_i)$.

Неопределенность наличия фишек описывается векторами распределения вероятностей каждой позиции. Перераспределение наличия фишек отражается в длине и компонентах векторов распределения. Определение элементов вектора распределения с вычислительной точки зрения вызывает некоторые трудности при считывании функции темпов (скоростей) переходов и времени пребывания в маркировке. С целью преодоления этой проблемы разработан алгоритм вычисления вероятности срабатывания, времени пребывания в маркировке разрешенного перехода и элементов вектора распределения вероятностей при изменении маркировки, после срабатывания перехода. Разработанный алгоритм состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Создание матрицы входных и выходных инцидентов и темпов переходов:

$$F = \{h_{ij}\}, \quad H = \{h_{ji}\}, \quad \Omega = \{\theta_j\},$$

где $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$.

Шаг 2. Создание начальной маркировки:

$$\mu = \{\mu_i\}, i = \overline{1, n}.$$

Шаг 3. Определение матрицы:

$$S = \{s_c\},$$

где $c = \overline{0, m}$ для фиксации номеров разрешенных переходов.

Шаг 4. Поиск разрешенного перехода:

а) выбираются все $f_{ij} \neq 0$, при $i = \overline{1, n}$;

б) для каждого фиксированного i должен быть $\exists \mu_i \neq 0$.

Шаг 5. Если для перехода t_j условие срабатывания выполняется, фиксируется номер этого разрешенного перехода:

$$c = c + 1; \quad s_c = j;$$

Шаг 6. Индекс j увеличивается на единицу: $j = j + 1$. При $j \leq m$ осуществляется переход к пункту a шага 4, в противном случае, если $c = 0$, то выводится сообщение о тупиковом состоянии, завершается поиск и осуществляется переход к пункту 13.

Шаг 7. Выбор перехода t_j с наибольшим темпом θ_j среди фиксированных переходов, при $j = s_i$, где $i = \overline{1, c}$;

Шаг 8. Вычисление вероятности срабатывания разрешенного перехода t_j в маркировке μ_i :

$$PF(t_j) = \frac{\theta_j}{\sum_{i=1}^c \theta_{s_i}}.$$

Шаг 9. Вычисление среднего времени пребывания в маркировке μ_i :

$$SJ(t_j) = \frac{1}{\sum_{i=1}^c \theta_{s_i}}.$$

Шаг 10. Формирование распределения вероятностей каждой входной позиции после срабатывания перехода t_j :

$$\mu'_i = \mu_i - f_{i,j};$$

Шаг 11. Формирование вектора распределения вероятностей каждой выходной позиции после срабатывания перехода:

$$\mu'_i = \mu_i + h_{j,i};$$

Шаг 12. По выбору пользователя или процесс продолжается и осуществляется переход к шагу 5, или процесс останавливается и осуществляется переход к шагу 13.

Шаг 13. Конец алгоритма.

Интегрированные ССП могут быть применены для моделирования различных стохастических процессов более широкого класса. Од-

нако при этом рассматриваемая сеть не лишена некоторых недостатков. Нет деклараций и пометок сети, которые дают возможность качественно характеризовать процессы и интерпретировать динамику меток сети.

Представление интегрированных РССП

Раскрашенные сети Петри (РСП) отражают логическую последовательность событий, взаимодействие параллельных процессов и позволяют проследивать потоки информации. Преимущество этого типа моделей состоит в простоте понимания на инженерном уровне и быстроте чтения графических образов. В системе CPNTools (Colored Petri Nets Tools) воспроизведение динамики меток на экране дисплея позволяет проследить ход и качественные характеристики процессов и эффективно интерпретировать динамику раскрашенных сетей [7]. Раскрашенная сеть состоит из трех частей: структуры сети, деклараций и пометки сети. Структура сети аналогична традиционной структуре. Таким образом, необходимо добавить в сеть возможность построения раскрашенных структур, таких как:

- C – функция цвета маркера, определяющая в данном случае цвет каждого из маркеров $M(p_i)$ для позиций сети;
- V – условия срабатывания переходов в зависимости от цвета маркера;
- K – емкость маркеров в позициях с учетом C .

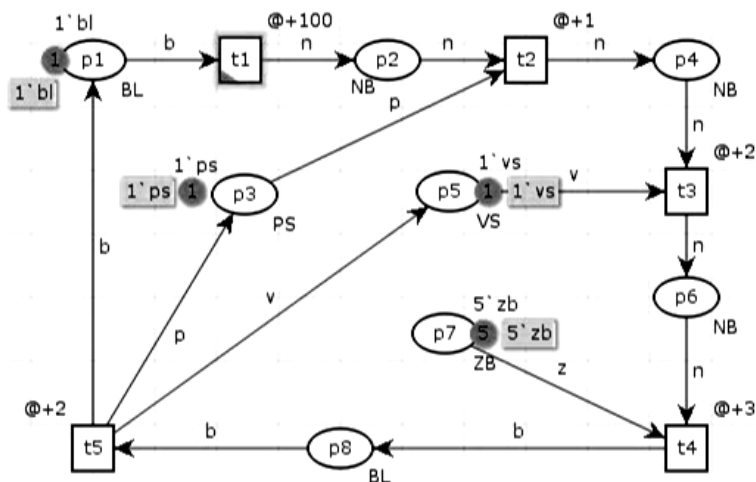
Каждое дополнительное свойство сети усложняет ее понимание, но при этом сокращает ее размерность, что, в конечном счете, упрощает процесс моделирования.

На сегодняшний день существует большое число программных продуктов, позволяющих проводить моделирование в режиме реального времени с помощью сетей Петри. Из них выделяют моделирующую систему CPNTools, которая в полной мере поддерживает раскрашенные СП. Более того, CPNTools также позволяет использовать свойства стохастических и временных сетей Петри при построении моделей. Задание стохастичности в нем возможно лишь с помощью процедур программирования на языке CPNML.

Поэтому целесообразна разработка подхода моделирования интегрированных РССП с помощью процедур программирования на языке CPNML на базе CPNTools.

В приводимом ниже примере рассмотрена модель функционирования технической системы, в которой требуется смоделировать про-

цессы возникновения и устранения в ней неисправностей. Известны статистические данные об интенсивностях возникновения отказов и длительностях таких операций, как поиск неисправностей, замена и ремонт отказавшего блока.



Позиции: p_1 – в системе имеются блоки, число = m ; p_2 – имеются неисправные блоки; p_3 – поисковая система свободна; p_4 – обнаружен неисправный блок; p_5 – восстанавливающая система свободна; p_6 – восстанавливается система; p_7 – имеются запасные блоки, число = n ; p_8 – заменен блок.

Случайным может быть число неисправных блоков, темпы появления отказов, темпы поиска неисправных блоков и восстановление блоков и т. п. При срабатывании перехода в РССП в определенный момент времени фишки изымаются из входных позиций перехода и мгновенно помещаются в выходные. Каждому переходу $t \in T$ сопоставляется темп $\Omega(t)$, являющийся параметром экспоненциального распределения.

В рассмотренном примере имеются позиции $P = \{p_1, p_2, \dots, p_7\}$ и переходы $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$. На основе функции входной и выходной инцидентности строятся дуги между позициями и переходами СП [8].

Матрица темпов переходов $\Omega = \{\theta_j\}$, где $j = \overline{1, m}$ представляется вектором модельных времен: (100; 1; 2; 3; 5).

Начальная маркировка $\mu_0 = (\mu_{0,1}; \mu_{0,2}; \mu_{0,3}; \mu_{0,4}; \mu_{0,5}; \mu_{0,6}; \mu_{0,7}; \mu_{0,8})$ представляется векторами: $\mu_0 = (1,0; 0,9; 0,7; 0,8; 0,7; 0,8; 0,7; 0,9)$.

Условия запуска переходов придставлены в виде кодового выражения на языке ML CPN, к которому применены объявленные константы, операции и функции.

Standart Declarations

colset UNIT=unit;

colset BOOL

closet INT

closet INTINF

closet TIME

colset BL=unit with bl;

colset NB=unit with nb;

colset ZB=unit with zb;

colset VS=unit with vs;

colset PS=unit with ps;

colset REAL

colset STRING

var b:BL;

var n:NB;

var z:ZB;

var v:VS;

var :PS;

При компьютерной реализации алгоритма получена последовательность событий в виде сработавших переходов $\delta = (t_1, t_2, t_3, t_4, t_5)$ и изменения маркировки графа. Алгоритм разрешает конфликтные ситуации и предотвращает образование тупиковых состояний в интегрированной ССП.

Заключение

На разработанной модели можно отрабатывать принципы управления, соответствующие различным ситуациям: выявлять недостатки, тупиковые состояния систем и вносить корректировки.

Потенциальные области применения разработанного подхода можно найти при моделировании когнитивных процессов, при проектировании интеллектуального управления динамическими системами со стохастическим характером параметров.

Литература

1. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. М.: Телеком, 2012. 284 с.
2. Florin G., Natkin S. Les reseaux de Petri stochastiques // *Technique et Science Informatique*. 1985. Vol. 4. N 1. P. 143–160.
3. Ларкин Е. В., Ивутин А. Н., Костомаров Д. С. Методика формирования сети Петри – Маркова для моделирования когнитивных технологий // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2013. Вып. 9. Ч. 1.
4. Jensen K., Podelski A. Tools and algorithms for the construction and analisys of systems // *International Journal on Software Tools for Technology*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. Volume 8. Issue 3. June 2006.
5. Лескин А. А., Мальцев П. А., Спиридонов А. М. Сети Петри в моделировании и управлении. Л.: Наука, 1989.
6. Тарасюк И. В. Стохастические сети Петри – формализм для моделирования и анализа производительности вычислительных процессов // *Системная информатика*. 2004. Вып. 9. С. 135–194. <http://itar.iis.nsk.su/files/itar/pages/spnsinf.pdf>
7. Jensen K., Kristensen L. M. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems // 1st Springer Publishing Company, Incorporated. 2009. 384 p.
8. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984.