

УДК 004.4'22

СВОЙСТВА ИНВЕРСИИ СЕТЕЙ ПЕТРИ*

А.В. МАРКОВ

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры автоматики. E-mail: tuvi-ton3@gmail.com

В данной работе дается определение математического аппарата сетей Петри и графа состояний, представлены найденные свойства сетей Петри: неучтенные исходные данные и потеря состояний. Предлагается способ инверсии цветных сетей Петри, направленным путем которых свойственна смена типов данных у меток.

При инверсии сетей Петри определенной конструкции появляются ранее неучтенные состояния, которые следует считать неиспользуемыми и учесть их при выполнении анализа. При реализации инверсии с последующим построением графа состояний инвертированной сети Петри необходимо учитывать, что некоторые состояния, присущие прямому графу, не будут исследованы, поскольку соответствующая ветка, в которой они находятся, имеет свое конечное, возможно тупиковое, состояние. Таким образом, при инверсии сети Петри, граф состояний которой имеет несколько веток и условие, при котором состояния разных веток по отношению к друг другу не обладают свойством покрываемости, исследуется частично относительно графа прямой сети.

Цветные сети Петри в отличие от простых имеют возможность изменять тип данных у меток в процессе работы, т. е. прямая инверсия (изменение направления взаимосвязей у вершин сети Петри) для данного случая не подходит – предлагается правило, по которому выполняется инверсия данных сетей Петри.

Ключевые слова: сети Петри, инверсия сети Петри, ординарная сеть Петри, простая сеть Петри, цветная (раскрашенная) сеть Петри, граф состояний, маркировка, протокол передачи данных

DOI: 10.17212/2307-6879-2014-4-139-152

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании программного обеспечения (ПО) применяют *UML* (Unified Modelling Language) и сети Петри [1, 2], использование которых позволяет моделировать статические и динамические свойства системы с последующим анализом последних [3–10]. *UML* – язык графического описания сис-

* Статья получена 10 июня 2014 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию № 2014/138. Тема проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности».

тем, использование которого позволяет увеличить скорость разработки программного продукта и уменьшить количество синтаксических, семантических и других видов ошибок. Сеть Петри представляется четверкой $N = (P, T, F, m_I)$, где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – множество мест, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ – множество переходов, таких что $P \cap T = \emptyset$, $F \subseteq P \times T \cup T \times P$ – отношение, а $m_I : P \rightarrow N$ – начальная маркировка. В местах размещаются метки (маркеры), способные перемещаться по сети. Для моделирования сетей Петри воспользуемся пакетом CPN Tools (version 4.0.0) [11].

Анализ систем заключается в анализе сетей Петри посредством построения и исследования пространства состояний [12], который является четверкой (V, E, src, trg) , где V – множество вершин, E – множество ребер между вершинами, а $src, trg : E \rightarrow V$ отображает в каждом ребре вершину, из которого оно получено, и вершину, к которой приводит выполнение срабатывания перехода, соответственно. При анализе больших систем существует вероятность «взрыва» пространства состояний $\exp(|P|) = |V|$, во избежание чего используют нестандартные способы анализа, одним из которых является исследование графа состояний отдельными частями. Для этого необходимо выбрать маркировки, с которых начинается анализ отдельных частей, и проверить их на достижимость¹ [13].

1. НЕУЧТЕННЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Одним из способов проверки достижимости является инверсия сетей Петри. Правила для данного способа получены для ординарных² [14] и простых³ [15] сетей Петри. При разработке данных правил найдена конструкция сети (рис. 1), при инверсии которой получаются новые маркировки (рис. 2).

Данные маркировки, при которых начинается моделирование сети Петри, следует считать неучтенными. Если скорректировать сеть относительно пря-

¹ Достижимость – возможность сети достигать заданные состояния из начального состояния $m \in [m_I]$. Покрываемость – возможность сети достигать заданные состояния из других состояний $m'' \in [m']$.

² Ординарная сеть Петри – сеть, представленная двудольным графом, кратность дуг которой не превышает единицы: $p_n \cap t_m \leq 1$.

³ Простая сеть Петри – сеть, в которой для представления маркеров используется один целочисленный тип данных.

мой с учетом новых начальных маркировок, получим следующие сети, представленные на рис. 3 и 4.

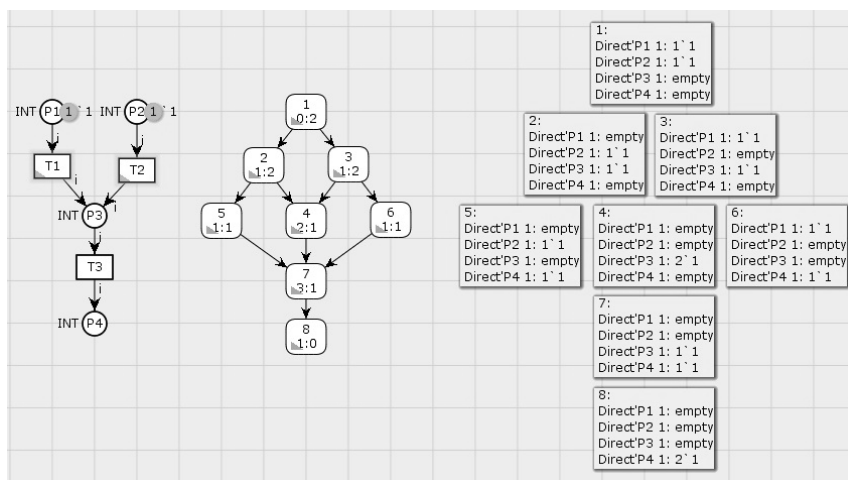


Рис. 1. Сеть Петри и пространство состояний, пример № 3 инверсии простой сети Петри [15]

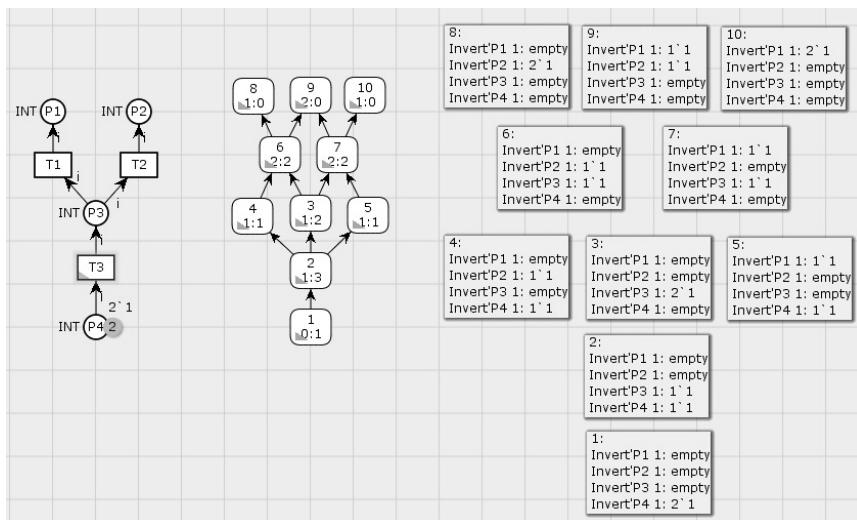


Рис. 2. Инвертированная сеть Петри и пространство состояний, пример № 3
инверсии простой сети Петри [15]

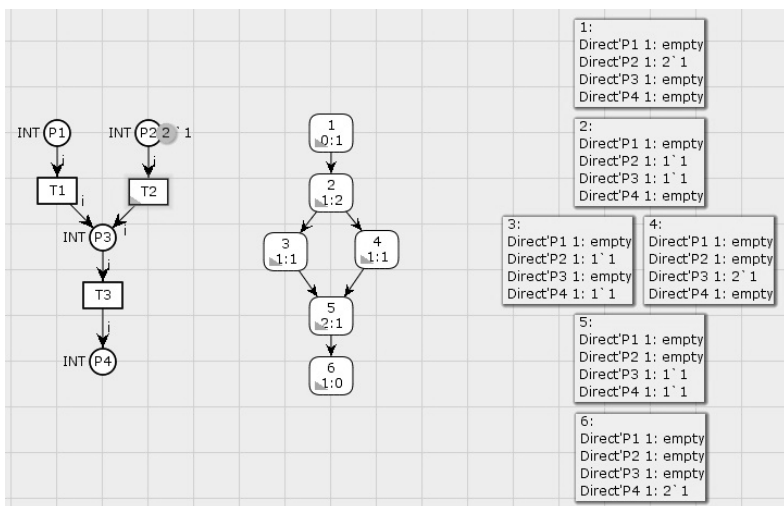


Рис. 3. Сеть Петри и пространство состояний с $m_I = (0, 2, 0, 0)$, пример № 3 –
инверсия простой сети Петри [15]

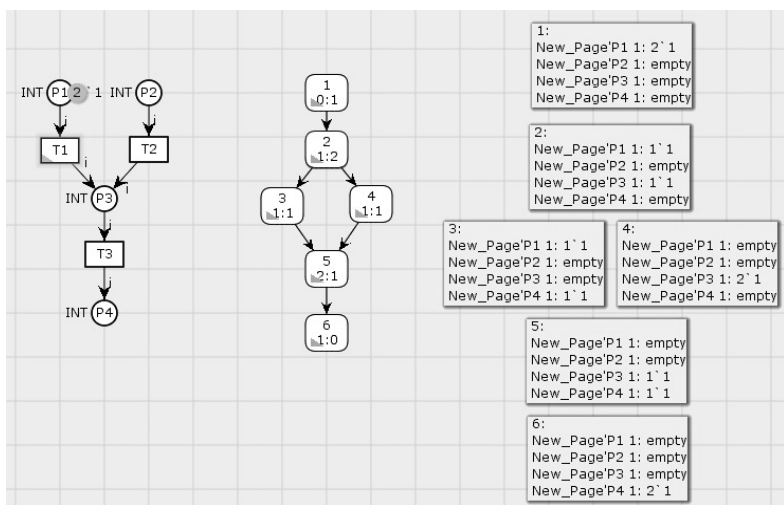


Рис. 4. Сеть Петри и пространство состояний с $m_I = (2, 0, 0, 0)$, пример № 3 – инверсия простой сети Петри [15]

Их пространство состояний является частью пространства состояний не-преобразованной сети (рис. 1). Данные маркировки не влияют на общее пространство состояний, но стоит предположить, что при исследовании сети начиная с этих маркировок могут быть найдены новые, возможно критичные.

2. ПОТЕРЯ СОСТОЯНИЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ИНВЕРСИИ

При реализации инверсии стоит учитывать возможность потери состояний. На примере протокола передачи данных (рис. 5) продемонстрируем данное свойство.

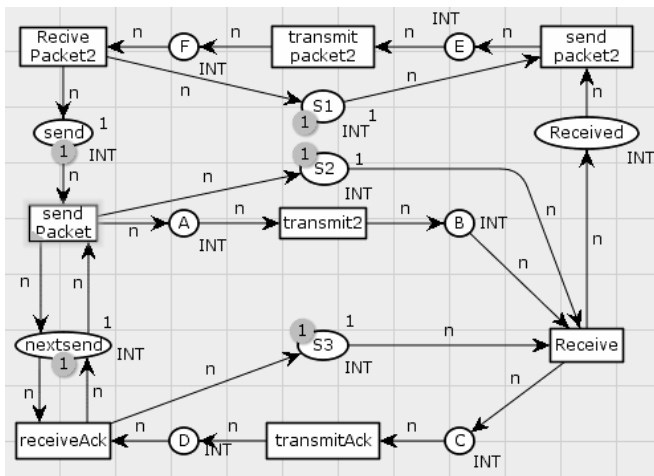


Рис. 5. Сеть Петри протокола передачи данных [13]

Данная сеть Петри имеет двенадцать мест P , восемь переходов T и начальную маркировку m_I :

$$P = \{ F, E, \text{Received}, B, C, S3, D, A, \text{nextsend}, \text{send}, S1, S2 \},$$

$$T = \{ \text{transmit packet2}, \text{send packet2}, \text{Receive}, \text{receiveAck}, \text{send Packet}, \text{Receive Packet2}, \text{transmit2}, \text{transmitAck} \};$$

$$m_I = (0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1).$$

Пространство состояний представлено на рис. 6.

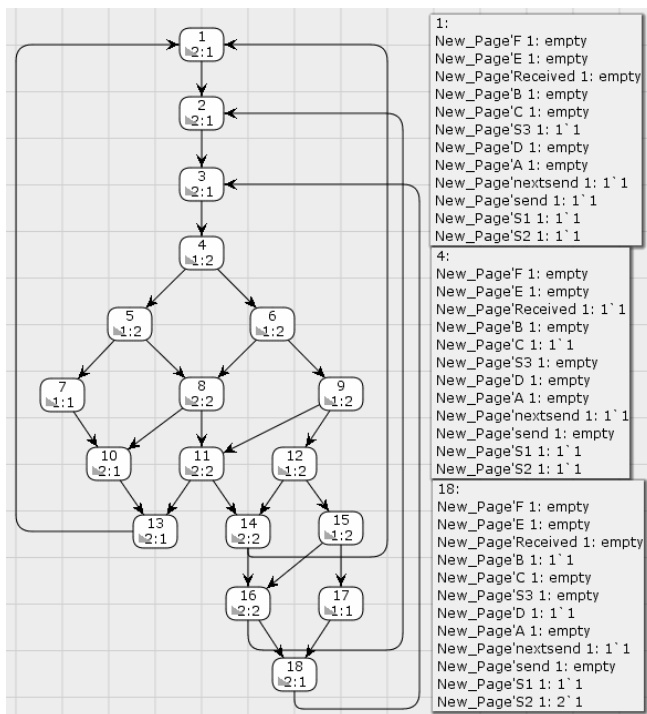


Рис. 6. Граф состояний сети Петри протокола передачи данных

Для инверсии данной сети необходимо изменить направления взаимосвязей у вершин прямой сети⁴. После преобразования сеть принимает вид, представленный на рис. 7.

Начальная маркировка, с которой начинается работа инвертированной сети, следующая: $m_I = (0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 2)$.

Отметим, что при построении графа состояний состояния m_7 , m_{10} , m_{13} (рис. 6) не найдены и будут получены только при исследовании состояний

⁴ Прямая сеть – неинвертированная сеть Петри.

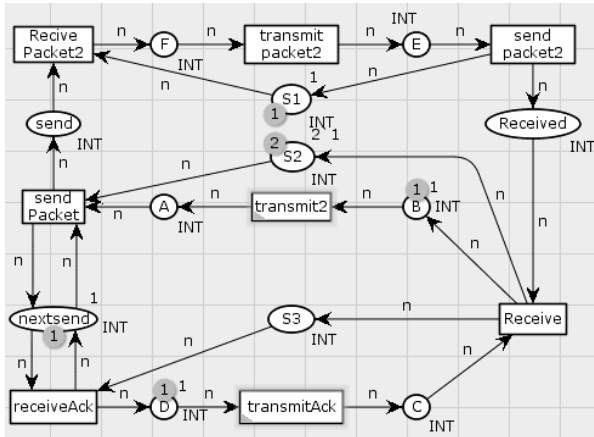
$$m_{13}, m_{14}, m_{15} \text{ (рис. 8): } (0,0,1,0,1,0,0,0,1,0,1,1) [Receive] (0,0,0,1,0,1,0,0,1,0,1,2), \\ (0,0,0,1,0,1,0,0,1,0,1,2) [transmit] (0,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,2), \\ (0,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,2) [send \text{ Packet}] (0,0,0,0,0,1,0,0,1,1,1,1).$$


Рис. 7. Инвертированная сеть Петри протокола передачи данных

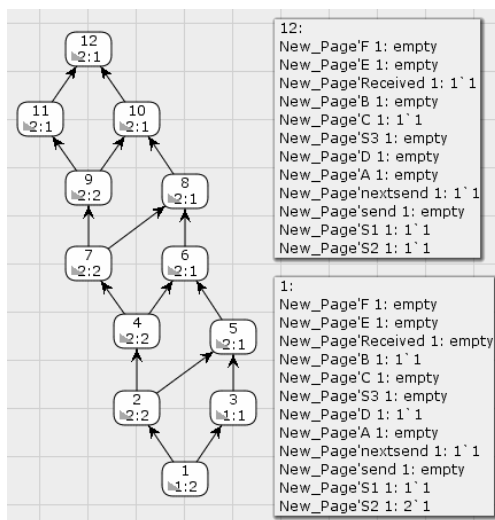


Рис. 8. Первая часть m_1, \dots, m_{12} графа состояний $\{m_1, \dots, m_{18}\}$ инвертированной сети Петри протокола передачи данных

В данном примере неисследованные сразу состояния достигаются по возвратным ребрам, но в случае отсутствия возвратных ребер такие состояния останутся неисследованными.

3. ИНВЕРСИЯ РАСКРАШЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

В работах [14, 15] предложены правила инверсии для ординарных и простых сетей, которых недостаточно при реализации инверсии в цветных⁵ (раскрашенных) сетях Петри. В упрощенной сети Петри интернет-магазина (рис. 9) присутствует два типа данных: авторизованный пользователь «2» и неавторизованный пользователь «1». Граф состояний для данной сети представлен на рис. 9.

⁵ Цветная сеть Петри – сеть, в которой для представления маркеров используется несколько типов данных.

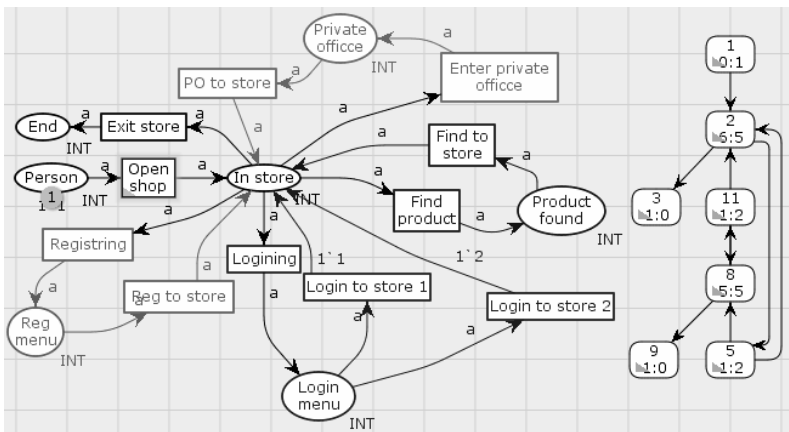


Рис. 9. Упрощенная сеть Петри интернет-магазина

Применение прямой инверсии без учета дуг с указанием на преобразование типов данных (рис. 9, $\{ \text{Login menu} \} [\text{Login to store 1} \vee \vee \text{Login to store 2} \} \{ \text{In store} \})$ приведет к некорректному преобразованию (рис. 10), а преобразование структуры сети не приведет к желаемому результату.

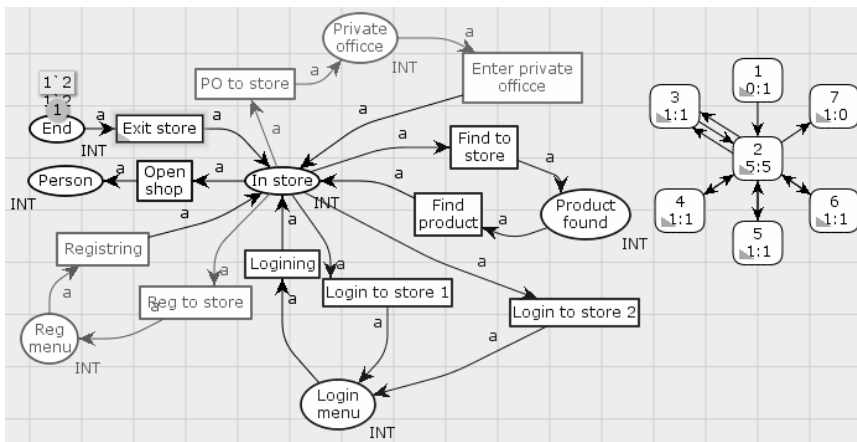


Рис. 10. Инвертированная сеть Петри и пространство состояний интернет-магазина без учета условий у взаимосвязей вершин сети

При переносе этих взаимосвязей к $t \bullet$, в отличие от начального $\bullet t$ получаем следующую сеть (рис. 11). При задании начальной маркировки с одним и другим типом данных получим следующий граф состояний: тип данных «1» (рис. 12, а), тип данных «2» (рис. 12, б).

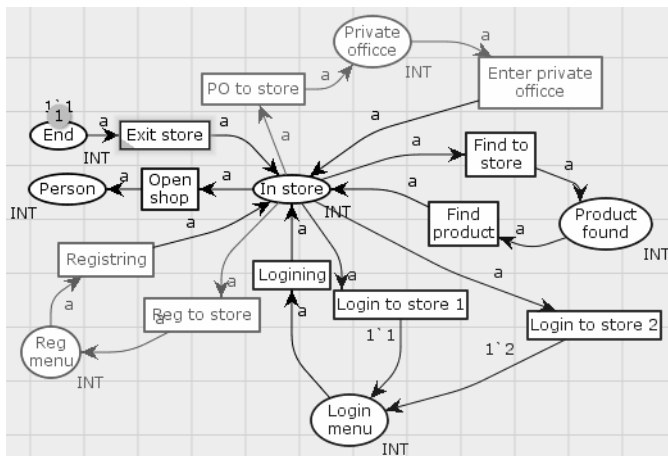


Рис. 11. Инвертированная сеть Петри интернет-магазина с учетом условий у взаимосвязей вершин сети

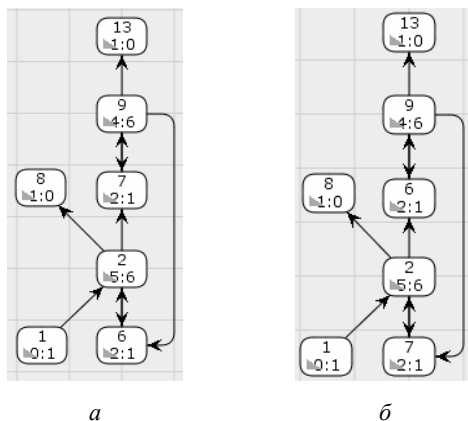


Рис. 12. Пространство состояний инвертированной сети Петри интернет-магазина с уче-

ТОМ

условий у взаимосвязей вершин сети:

 a – метка в месте $End\ 1'1$; \bar{b} – метка в месте $End\ 1'2$

Отметим, что структура графа состояний прямой сети и инвертированной совпадают, но состояние m_8 достигается из разных состояний. Таким образом, для раскрашенных сетей Петри необходимо разработать правила инверсии.

ВЫВОДЫ

Таким образом, представлены найденные свойства сетей Петри: нахождение неиспользуемых исходных данных и потеря состояний у графа инвертированной сети. Найдено, что при инверсии сетей Петри определенной конструкции $(\{P1\}[T1] \cup \{P2\}[T2])\{P3\}; \{P3\}[T3]\{P4\}$, $m_I = (1, 1, 0, 0)$ появляются ранее неучтенные состояния, которые следует считать неиспользуемыми и учесть их при выполнении анализа. Отметим, что при инверсии сетей Петри с разветвленной структурой графа состояний некоторые состояния, присущие прямому графу, не будут исследованы, поскольку соответствующая ветка, в которой они находятся, имеет свое конечное, возможно тупиковое, состояние. Таким образом, при инверсии сети Петри, граф состояний которой имеет нескольких веток и условие, что состояния разных веток по отношению к друг другу не обладают свойством покрываемости $m'' \in [m']$, исследуется частично относительно графа прямой сети, что показано на примере протокола передачи данных.

На примере упрощенной сети Петри интернет-магазина показана инверсия цветных сетей с возможностью динамического изменения типа данных у меток, но для корректной инверсии цветных сетей со структурой любой сложности необходимо разработать соответствующие правила.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
2. Воевода А.А., Коротиков С.В., Саркенов Д.О. Применение сетей Петри при разработке протоколов // Научный вестник НГТУ. – 2004. – № 2 (17). – С. 183–188.

3. *Коротиков С.В.* Применение сетей Петри в разработке программного обеспечения центров дистанционного контроля и управления: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.11 / Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2007. – 216 с.
4. *Романников Д.О., Марков А.В.* Пример применения методики разработки ПО с использованием UML-диаграмм и сетей Петри // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 1 (67). – С. 175–180.
5. *Романников Д.О.* Разработка программного обеспечения с применением UML диаграмм и сетей Петри для систем управления локальным оборудованием: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.11 / Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2012. – 195 с.
6. *Воевода А.А., Романников Д.О.* Использование UML и временных сетей Петри при разработке программного обеспечения // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – № 3 (61). – С. 61–70.
7. *Воевода А.А., Романников Д.О.* Использование UML и временных сетей Петри в методе разработки ПО. Ч. 2 // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – № 4 (62). – С. 117–126.
8. *Воевода А.А., Марков А.В.* Методика автоматизированного проектирования программного обеспечения функционирования сложных систем на основе совместного использования UML диаграмм и сетей Петри // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 2 (42). – С. 110–115.
9. *Воевода А.А., Марков А.В., Романников Д.О.* Разработка программного обеспечения: проектирование с использованием UML диаграмм и сетей Петри на примере АСУ ТП водонапорной станции // Труды СПИИРАН. – 2014. – Вып. 3 (34). – С. 218–231.
10. *Марков А.В., Романников Д.О.* Алгоритм автоматической трансляции диаграммы активности в сеть Петри // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 1 (22). – С. 104–112.
11. *Воевода А.А., Коротиков С.В., Хассоунех В.* О моделировании системы дистанционного контроля и управления информацией цветной временной сетью Петри в пакете CPN Tools: инициализация модели // Научный вестник НГТУ. – 2004. – № 3 (18). – С. 185–188.
12. *Воевода А.А., Романников Д.О.* Редуцирование пространства состояний сети Петри для объектов из одного класса // Научный вестник НГТУ. – 2011. – № 4 (45). – С. 146–150.
13. *Марков А.В., Воевода А.А.* Проверка достижимости маркировки сетей Петри при помощи инвертирования деревьев состояний для протокола передачи данных // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 1 (31). – С. 143–148.

14. Марков А.В., Воевода А.А. Инверсия простой ординарной сети Петри // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 4 (53). – С. 215–218.

15. Марков А.В. Инверсия сетей Петри // Сборник научных трудов НГТУ. – 2013. – № 4 (74). – С. 97–121.

Марков Александр Владимирович – магистр техники и технологии по специальности «Автоматизация и управление» (аспирант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета). Основное направление исследования – анализ UML-диаграмм и сетей Петри. Имеет более 30 публикаций. E-mail: muviton3@gmail.com

Properties inversion Petri nets^{*}

A.V. Markov

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marks prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, postgraduate student of the department of automation. E-mail: muviton3@gmail.com

In this paper, we define mathematical formalism of Petri nets and graph states, presents found properties of Petri nets: unrecorded original data and loss of state. Provides a method of inversion colored Petri nets, directed arcs that are inherent in the change of data types in tags.

When inversion Petri nets certain design appear earlier unrecorded state, which should be considered unusable and take them into account in the analysis. In implementing the inversion followed by the construction of a state graph inverted Petri net, be aware that some conditions inherent in the direct graph will not be investigated, since the corresponding branch in which they are located, has a finite, possibly deadlock, state. Thus, when the inversion Petri nets, state graph, which has several branches and the condition that the state of different branches in relation to each other do not have covering property, partially investigated with respect to line of graph net.

Colored Petri nets as opposed to simple have the ability to change the data type from the labels in the process, i.e. direct inversion (change of direction relationships among vertices Petri nets) for this case is not suitable – proposed rule that performs the inverse data Petri nets.

Keywords: Petri nets, inversion of Petri net, ordinary Petri net, simple Petri net, colored Petri net, state graph, marking, data transfer protocol

REFERENCES

1. Peterson J.L. *Petri net theory and the modeling of systems*. New Jersey, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1981. 288 p. (Russ. ed.: Piterson Dzh. *Teoriya*

^{*} Received 10 June 2014.

Work is executed at financial support of the Minobrnauka Russia state job № 2014/138, the theme of the project "New patterns, models and algorithms for breakthrough methods of control of technical systems based on high results intellectuality activity".

setei Petri i modelirovanie. Moscow, Mir Publ., 1984. 264 p.).

2. Voevoda A.A., Korotikov S.V., Sarkenov D.O. Primenenie setei Petri pri razrabotke protokolov [Application of Petri nets in the engineering of protocols]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2004, no. 2 (17), pp. 175–180.

3. Korotikov S.V. *Primenenie setei Petri v razrabotke programmno obespecheniya tsentrov distantsionnogo kontrolya i upravleniya*. Diss. kand. tehn. nauk [The use of Petri nets in software development centers, remote monitoring and control. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2007. 216 p.

4. Romannikov D.O., Markov A.V. Primer primeneniya metodiki razrabotki PO s ispol'zovaniem UML-diagramm i setei Petri [Modification of the methodology of software development using UML diagrams and Petri nets]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2012, no. 1 (67), pp. 175–180.

5. Romannikov D.O. *Razrabotka programmno obespecheniya s primenением UML diagramm i setei Petri dlya sistem upravleniya lokal'nyy oborudovaniem*. Diss. kand. tekhn. nauk [Software development using UML diagrams and Petri nets for local control systems equipment. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2012. 195 p.

6. Voevoda A.A., Romannikov D.O. Ispol'zovanie UML i vremennykh setei Petri pri razrabotke programmno obespecheniya [UML and Timed Petri nets using in the approach of software design]. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU – Transaction of Scientific Papers of Novosibirsk State Technical University*, 2010, no. 3 (61), pp. 61–70.

7. Voevoda A.A., Romannikov D.O. Ispol'zovanie UML i vremennykh setei Petri v metode razrabotki PO. Ch. 2 [Using UML and time Petri nets in software development. Pt. 2]. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU – Transaction of Scientific Papers of Novosibirsk State Technical University*, 2010, no. 4 (62), pp. 117–126.

8. Voevoda A.A., Markov A.V. Metodika avtomatizirovannogo proektirovaniya programmno obespecheniya funktsionirovaniya slozhnykh sistem na osnove sovmestnogo ispol'zovaniya UML diagramm i setei Petri [Methodology of computer-aided design software of complex systems based on combined use of UML diagrams and Petri nets]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern Technologies. System analysis. Modeling*, 2014, no. 2 (42), pp. 110–115.

9. Voevoda A.A., Markov A.V., Romannikov D.O. Razrabotka programmno obespecheniya: proektirovanie s ispol'zovaniem UML diagramm i setei Petri na primere ASU TP vodonapornoi stantsii [Software development: software design using UML diagrams and Petri nets for example automated process control system

of pumping station]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS proceedings*, 2014, iss. 3 (34), pp. 218–231.

10. Markov A.V., Romannikov D.O. Algoritm avtomaticheskoi translyatsii diagrammy aktivnosti v set' Petri [Algorithm of automatic conversion of the activity diagram into Petri-net structure formats]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 1 (31), pp. 104–112.

11. Voevoda A.A., Korotikov S.V., Khassounekh V. O modelirovanii sistemy distantsionnogo kontrolya i upravleniya informatsiei tsvetnoi vremennoi set'yu Petri v pakete CPN Tools: initsializatsiya modeli [About modeling of systems for remote monitoring and information management colored time Petri net in CPN Tools: initialization of model]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2004, no. 3 (18), pp. 185–188.

12. Voevoda A.A., Romannikov D.O. Redutsirovanie prostranstva sostoyanii seti Petri dlya ob"ektov iz odnogo klassa [Reducing the state space of Petri nets for objects of one clas]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2011, no. 4 (45), pp. 146–150.

13. Markov A.V., Voevoda A.A. Proverka dostizhimosti markirovki setei Petri pri pomoshchi invertirovaniya derev'ev sostoyanii dlya protokola peredachi dannykh [Checking the accessibility of marking Petri nets by inverting state trees for data transmission protocol]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of TUSUR*, 2014, no. 1 (31), pp. 143–148.

14. Markov A.V., Voevoda A.A. Inversiya prostoi ordinarnoi seti Petri [Inversion of simple ordinary Petri nets]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2013, no. 4 (53), pp. 215–218.

15. Markov A.V. Inversiya setei Petri [Inversion of Petri nets]. *Sbornik nauchnyh trudov NGTU – Transaction of Scientific Papers of Novosibirsk State Technical University*, 2013, no. 4 (74), pp. 97–121.