

**Гильметдинов Ринат Рафаилович**

Магистрант НАЧОУ ВПО СГА

**Направление:** Информатика и вычислительная техника:

**Магистерская программа:** Распределенные автоматизированные системы

### **Трансляция вложенных сетей Петри в раскрашенные сети Петри**

**Аннотация:** Анализ, валидация и верификация коммуникационных протоколов — актуальная проблема современного программирования. Среди различных сетей Петри высокого уровня можно выделить раскрашенные сети Петри (РСП), принятые в качестве международного стандарта. В данной работе показано, что одним из способов провести имитационное моделирование и верификацию NP-сетей является их трансляция в раскрашенные сети Йенсена.

**Ключевые слова:** сети Петри, NP-сети, имитационное моделирование, верификация, алгоритм трансляции NP-сетей в CP-сети.

Сфера применения сетей Петри и их моделирующие возможности значительно расширились с начала 60-х годов XX века. Эти структуры, являющиеся интеграцией графа и дискретной динамической системы, могут достаточно эффективно моделировать и статические свойства, и динамику объекта. Особую популярность сети Петри получили при моделировании параллельных процессов – в данной области это один из самых удобных и динамично развивающихся инструментов. Большую роль в широком распространении данных сетей сыграло удобство их программирования на ЭВМ.

Стоит отметить, что сети Петри находят применение не только в моделировании процессов и динамических систем. Они успешно применяются в теоретическом программировании [23], при организации вычислительных

процессов и управления [22, 27] при решении задач функциональной верификации и спецификации процессов [22].

Немаловажным фактором является наблюдающаяся в последнее время тенденция к смещению от традиционной парадигмы вычислений к новым способам – облачным, совместным, распределенным. В таких вычислениях программное и аппаратное вычисление, логическое управление, вычислительные ресурсы и данные становятся максимально децентрализованными. Это в конечном итоге привело к широкому распространению многоагентных систем (МАС).

В МАС вычисление распределяется по узлам-агентам, которые взаимодействуют друг с другом для достижения локальных целей, а результатом их совместной работы является решение глобальной задачи системы. Однако трудность заключается в том, что необходимо организовать правильное поведение не только каждого отдельного агента, но и скоординировать работу всей системы. Это требует применения строгих математических методов анализа и моделирования.

Именно сети Петри стали одними из самых успешных формализмов для описания распределенных и параллельных систем. Но существенным недостатком при моделировании МАС оказалась плоская статическая структура сетей Петри. Решение этой проблемы предложил Р. Фальк [19]. Этим решением стали вложенные сети Петри (NP-сети).

NP-сети являются расширением классических сетей Петри [25]. Фишки, задающие маркировку NP-сети, сами являются сетями Петри. При этом вложенные сети обладают автономным поведением и взаимодействуют друг с другом и основной сетью. Координация объектов на разных уровнях NP-сети обеспечиваются переходами синхронизации. Модели NP-сетей обладают слабосвязанной динамической многоуровневой структурой, что позволяет естественным образом моделировать многоуровневые распределенные многоагентные системы с мобильными агентами. С помощью NP-сетей успешно моделируются одноранговые сетевые протоколы, интеллектуальные

системы, производственные процессы [25, 7, 16].

В связи с эффективностью и большим потенциалом вложенных сетей Петри важной проблемой становится разработка методов анализа поведения NP-сетей. Большой интерес представляет разработка методов для имитационного моделирования и верификации NP-сетей.

Имитационное моделирование служит средством анализа динамических свойств модели. Такое моделирование помогает обнаружить явные дефекты и узкие места в поведении системы на ранних этапах проектирования.

Важным инструментом анализа поведения объекта является граф достижимости. С его помощью можно проверить систему на соответствие свойствам безопасности, живости, справедливости, обнаруживать потенциальные тупики, активные блокировки, нарушения условий взаимного исключения.

Несмотря на все достоинства NP-сетей, отсутствие инструментальной поддержки для их имитационного моделирования и анализа их свойств существенно ограничивает возможность их применения и препятствует распространению. Однако тут на помощь приходят раскрашенные сети.

В данной работе показано, что одним из способов провести имитационное моделирование и верификацию NP-сетей является их трансляция в раскрашенные сети Йенсена. Преимуществом раскрашенных сетей Петри (CP-сетей) является их полнота по Тьюрингу, а так же инструментальная поддержка моделирования с помощью CPN Tools [11].

Результатом трансляции исходной NP-сети является эквивалентная ей по поведению целевая CP-сеть. Эта раскрашенная сеть служит объектом анализа свойств и имитационного моделирования, результаты которого интерпретируются на исходную NP-сеть.

Рассмотрим раскрашенные и вложенные сети Петри. Пусть  $U$  – универсальное множество,  $N$  – множество натуральных чисел. *Expr* – язык над переменными и константами *Var* и *Con* соответственно, выражениями языка *Expr* помечены дуги. Интерпретация *I* такая, что для любой согласованной по

типам оценки  $u: Var \rightarrow U$  значение  $I(e, u) \in N^U$  выражения  $e \in Expr$  определено.  $Lab$  – множество меток переходов, метка скрытых переходов  $\tau$  не содержится в  $Lab$ .

Определение 1. Раскрашенной сетью над  $U$  называется кортеж  $(P, T, F, v, \rho, \Lambda)$ , где

–  $P$  – непересекающиеся конечные множества позиций и переходов соответственно;

–  $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  – множество дуг;

–  $v: F \rightarrow 2^U$  – функция типов позиций;

–  $\rho: F \rightarrow Expr$  – функция меток дуг;

–  $\Lambda: T \rightarrow Lab \cup \{\tau\}$  – функция меток переходов.

Для раскрашенной сети  $N = (P, T, F, u, \rho, \Lambda)$  над  $U$  разметка  $N$  – это функция  $m: P \rightarrow N^U$ , такая, что  $m(p) \in N^{v(p)}$  для  $p \in P$ . Пара  $(N, m)$  называется размеченной сетью Петри.

Переход  $t \in T$  активен в разметке  $m$  тогда и только тогда, когда  $\exists v \forall p \in P: (p, t) \in F \Rightarrow m(p) \geq I(\rho(p, t), v)$ . Активный переход  $t$  может сработать, порождая новую разметку  $m'(p) = m(p) - I(\rho(p, t), v) + I(\rho(t, p), v)$  для каждого  $p \in P$ . Размеченная раскрашенная сеть определяет систему переходов, представляющее наблюдаемое поведение сети.

Вложенные сети Петри – это расширенные раскрашенные сети Петри над специальным универсумом, состоящим из элементов конечного множества  $S$  (атомарных фишек) и размеченных сетей Петри (сетевых фишек).

Пусть  $N$  – раскрашенная сеть Петри. Через  $M(N, S)$  обозначим множество всех размеченных сетей, получаемых из  $N$  добавлением разметок над  $S$ .

Пусть  $N_1, \dots, N_k$  – CP-сети над  $S$ . Определим универсум  $U(N_1, \dots, N_k) = S \cup M(N_1, S) \cup \dots \cup M(N_k, S)$  с множеством типов  $\Omega(N_1, \dots, N_k) = \{S, M(N_1, S), \dots, M(N_k, S)\}$ . Такие множества  $M(N, S)$  назовем типами.

Определение 2. Пусть  $Lab$  – множество меток переходов,  $N_1, \dots, N_k$  CP-сети над  $S$ , в которых все переходы помечены из  $Lab \cup \{\tau\}$ . NP-сетью

называется кортеж  $NP = (N_1, \dots, N_k, SN)$ ;  $N_1, \dots, N_k$  в таком случае называют элементарными сетями, а  $SN$  – системной сетью.  $SN = (P_{SN}, T_{SN}, F_{SN}, v, \rho, \Lambda)$  – это раскрашенная сеть Петри над универсумом  $U = U(N_1, \dots, N_k)$ , где позиции соответствуют типам из  $\Omega = \Omega(N_1, \dots, N_k)$ , переходы помечены метками из  $Lab \cup \{\tau\}$ , а язык меток дуг  $Expr$  определен ниже. Говорят, что позиция типа  $M(N, S)$  имеет тип  $N$ .

Пусть  $Con$  – множество констант, интерпретированных над  $U$  и  $Var$  – множество переменных, типизированных  $\Omega$  - типами. Тогда выражения языка  $Expr$  являются мультимножествами элементов одного типа над  $Con \cup Var$  с двумя дополнительными ограничениями для каждого перехода  $t \in T_{SN}$ :

1) Не допускаются константы и множественное вхождение переменной в выражениях на входных дугах переходов;

2) Каждая переменная из выражений на выходных дугах перехода  $t$  должна встречаться в одном из выражений на входных дугах этого перехода.

Первое ограничение исключает возможность проверки равенства разметок сетевых фишек. Если его исключить, становится возможным реализовать проверку на нулевую разметку сетевых фишек и сделать формализм NP-сетей полным. Второе ограничение исключает бесконечное ветвление.

Разметка NP-сети полностью определяется разметкой своей системной сети. Разметка отображает каждую позицию системной сети в мультимножество атомарных или сетевых фишек соответствующего вида.

Также необходимо рассмотреть трансляции NP-сетей в CP-сети.

Требования, накладываемые на трансляцию, зависят от вида требуемого анализа. Имитационное моделирование требует, чтобы целевая модель на каждом шаге вела себя так же, как исходная. Подробнее, это требование говорит о том, что целевая модель должна предлагать такой же выбор действий и приводить в результате действия к результату, подобному для такого же действия в исходной модели.

Для построения адекватного графа достижимости целевой модели нужно установить, как узлы построенного графа достижимости целевой модели соотносятся с состояниями исходной.

Так как одной из главных причин, побуждающих к трансляции NP-сетей в CP-сети, является инструментальная поддержка моделирования и анализа последних, необходимо соответствие целевой модели требованиям используемого для анализа и моделирования программного инструментария. Требуется, чтобы срабатывание перехода при любой заданной оценке в CP-сети однозначно определяло следующее ее состояние.

Рассмотрим алгоритм трансляции NP-сетей в CP-сети. Приведенный ниже алгоритм состоит из 5 шагов.

Исходной сетью будет NP-сеть  $NPN = (N_1, \dots, N_k, SN)$  с начальной разметкой  $M_0$ . По завершении алгоритма мы должны получить CP-сеть  $CPN = (P_C, T_C, F_C, u, \rho, \Lambda, m_0)$ . Для NPN структура графа сети CPN подобна структуре системной сети SN. Параллельно с построением определяем биекцию  $t_{TP} : P_{SN} \rightarrow P_C$  и сюръекцию  $t_{TT} : T_{SN} \cup T_{N_1} \cup \dots \cup T_{N_k} \rightarrow T_C$ . Первая функция отображает позиции системной сети на позиции целевой сети, а вторая – переходы системной и элементных сетей на переходы целевой сети.

1 шаг. Определяем позиции CPN. Для каждой позиции  $p \in P_{SN}$  в сети SN строится позиция  $p' \in P_C$  и задается  $t_{TP}(p) = p'$ . Если  $p$  типизирована множеством  $S$  атомарных объектов, то  $p'$  также типизирована  $S$ , но уже в CPN.

Если же  $p$  типизирована элементной сетью  $E$  в SN, то  $p'$  будет типизирована в CPN множеством векторов натуральных чисел, при этом размерность вектора будет равна размерности разметок сети  $E$ , или другими словами совпадет с мощностью множества позиции в  $E$ .

Таким образом, графовая структура сетевой фишки определяется типом позиции CPN, в которой располагается фишка. Через  $t_{TM}(M)$  обозначим векторы натуральных чисел, представляющих разметку  $M$ .

2 шаг. Задаем элементарно-автономные переходы в CPN. Для каждой позиции  $p \in P_{SN}$ , типизированной сетью  $E = v(p)$ , для каждого перехода  $t \in T_E$

построим переход-петлю  $t'$  в CPN и определим  $tr_T = t'$ . У  $t'$  будет одна входная дуга  $(tr_P(p), t')$  и одна выходная  $(t', tr_P(p))$ .

3 шаг. Эмулируем системно-автономных переходов. Для каждого перехода  $t \in T_{SN}$  строим новый переход  $t'$  в CPN и задаем  $tr_T = t'$ . Для каждой дуги  $f = (p, t)$  или  $f = (t, p)$  в  $F_{SN}$  добавляем новую дугу  $f' = (tr_P(p), tr_T(t))$  или, соответственно  $f' = (tr_T(t), tr_P(p))$ .

4 шаг. Эмулируем переходы синхронизации. Для каждого перехода  $t \in T_{SN}$  с меткой синхронизации строится новый  $t'$ , эмулирующий шаги вертикальной синхронизации в NPN. Срабатывание перехода синхронизации состоит из одновременного срабатывания системного перехода и срабатываний переходов с такой же меткой синхронизации в каждой вовлеченной сетевой фишке.

5 шаг. Пусть  $M_0$  – начальная разметка в NPN. Начальную разметку  $m_0$  целевой раскрашенной сети получим так: для каждой позиции  $p \in SN$ , типизированной атомарным типом,  $m_0(tr_P(p)) = M_0(p)$ , если же  $p$  типизирована элементной сетью, положим  $m_0(tr_P(p)) = tr_M(M_0(p))$ .

Бисимулярность исходной и целевой сетей формулируется следующей теоремой:

Теорема. Если NPN – размеченная NP-сеть, CPN-размеченная CP-сеть, полученная из NPN в результате выполнения алгоритма, приведенного выше, то NPN и CPN бисимулярны.

Обозначим через  $M(NPN)$  и  $M(CPN)$  множества достижимых разметок для сетей NPN и CPN соответственно. Для доказательства введем отношение  $R \subseteq M(NPN) \times M(CPN)$  такое, что  $(M, m) \in R$  тогда и только тогда, когда  $p \in SN$ , типизированной атомарным типом,  $m_0(tr_P(p)) = M_0(p)$ , и для каждой  $p$ , типизированной элементной сетью, положим  $m_0(tr_P(p)) = tr_M(M_0(p))$ . Тогда то, что  $R$  является бисимуляцией, следует из определения приведенной выше трансляции.

## Литература

1. van der Aalst, W.M.P., Stahl C., Westergaard M. Strategies for Modeling Complex Processes Using Colored Petri Nets // ToPNoC V. 2012. LNCS 6900.
2. Bashkin V.A., Lomazova I.A. Resource Driven Automata Nets // Fundamenta Informaticae. 2011. Vol. 109(3).
3. Bednarczyk M.A., Bernardinello L., Pawlowski W., Pomello L. Modelling mobility with Petri Hypernets // Recent Trends in Algebraic Development Techniques. 2005. LNCS 3423.
4. Bocaneala C. Modeling intelligent systems with level Petri nets // Annals of Dunarea de Jos Year. 2008. Vol. 31(2).
5. Chang L., He X., Lian J., Shatz S. Applying a Nested Petri Net Modeling Paradigm to Coordination of Sensor Networks with Mobile Agents // Proc. of Workshop on Petri Nets and Distributed Systems, Xian, China, 2008.
6. Dvoryansky L.V., Lomazova I.A. Compositionality of some behavioral properties for free-choice nested Petri nets. // Proc. Second Workshop "Program Semantics, Specification and Verification: Theory and Application". Yaroslavl, 2011.
7. Dworzanski L. W., Lomazova I.A. On Compositionality of Boundedness and Liveness for Nested Petri Nets // Fundamenta Informaticae. 2012. Vol. 120(3–4).
8. Hoffmann K., Ehrig H., Mossakowski T. High-level nets with nets and rules as pokens // Proc. ICATPN. 2005. LNCS 3536.
9. ter Hofstede A.H.M., van der Aalst W.M.P., Adams M., Russell N. Modern Business Process Automation: YAWL and its support environment. Springer, 2010. 676 p.
10. Jensen K., Kristensen L. M. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Springer, 2009. 396 p.
11. Jensen K., Kristensen L.M., Wells L. Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modelling and Validation of Concurrent Systems // International Journal on Software Tools for Technology Transfer. 2007. Vol. 9(3–4).
12. Kohler M., Farwer M. Object nets for mobility // Proc. ICATPN. 2007. LNCS 4546.



13. Kohler-Bussmeier M. Hornets: Nets within nets combined with net algebra // Proc. Applications and Theory of Petri Nets. 2009. LNCS 5606. P. 243–262.
14. Lomazova I. A. Nested Petri nets — a Formalism for Specification and Verification of Multi-Agent Distributed Systems // Fundamenta Informaticae. 2000. Vol. 43(1–4).
15. Lomazova I. A. Nested Petri Nets: Multi-level and Recursive Systems // Fundamenta Informaticae. 2001. Vol. 47(3–4).
16. Lomazova I. A. Nested Petri Nets for Adaptive Process Modeling // Pillars of Computer Science: Essays Dedicated to Boris (Boaz) Trakhtenbrot on the Occasion of His 85th Birthday. 2008. LNCS 4800.
17. Mascheroni M., Farina F. Nets-Within-Nets paradigm and grid computing // Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency V. 2012. LNCS 7347.
18. Pawlowski W. Petri Hypernets with Constraints // Proc. “Concurrency, Specification and Programming (CS&P 2009)”. 2009.
19. Valk R. Petri Nets as Token Objects: An Introduction to Elementary Object Nets // Proc. of ICATPN’98. LNCS1420. 1998.
20. Алексеев Г.И., Мыльников С.П. Программная реализация Петри-машины. — В кн.: Многопроцессорные вычислительные системы и их математическое обеспечение. Новосибирск: Изд-во ВЦ СО АН СССР, 1982.
21. Анишеев П.А., Ачасова С.М. Бандман О.П. и др. Методы параллельного микропрограммирования. Новосибирск: Наука, 1981.
22. Баер Ж.Л. Методы исследования параллелизма. В кн.: Системы параллельной обработки. М.: Мир, 1985.
23. Котов В.Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984.
24. Лескин А.А., Мальцев П.А., Спиридонов А.М. Сети Петри в моделировании и управлении. Л.: Наука, 1989.
25. Ломазова И.А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределенных систем с объектной структурой. М.: Научный Мир, 2004.
26. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984.

27. Управление ГПС: Модели и алгоритмы. М.: Машиностроение;  
Берлин: Техник, 1987.

© Бюллетень магистранта 2014 год № 1