

УДК 621.39, 004.7

**МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В ФОРМЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ**

*Шмелёва Т.Р.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
[tishtri@rambler.ru](mailto:tishtri@rambler.ru)*

**МЕТОД ПЕРЕТВОРЕННЯ МОДЕЛЕЙ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ  
НАДАНИХ У ВИГЛЯДІ СІТОК ПЕТРИ**

*Шмельова Т.Р*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.  
[tishtri@rambler.ru](mailto:tishtri@rambler.ru)*

**METHOD FOR TRANSFORMING MODELS OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS  
REPRESENTED IN THE FORM OF PETRI NETS**

*Shmeleva T.R.*

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,  
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.  
[tishtri@rambler.ru](mailto:tishtri@rambler.ru)*

**Аннотация.** Разработан метод преобразования моделей телекоммуникационных систем представленных в форме бесконечных сетей Петри в раскрашенные сети Петри. Метод предназначен для оценки временных и вероятностных характеристик телекоммуникационных сетей. Базовый фрагмент бесконечной сети используется как графический шаблон при формировании раскрашенных сетей, дальнейший процесс преобразования модели состоит в детализации атрибутов элементов сети, с помощью абстрактных типов данных и функций языка функционального программирования CPN ML. Модель дополняется измерительными фрагментами для оценки производительности и качества обслуживания сети. На основе предварительных оценок ограниченности, живости и безопасности систем, выполненных путем анализа бесконечных сетей Петри, сформированы средства оценки количественных характеристик поведения систем. Построение выполнено на примере преобразования модели прямоугольной вычислительной решетки. Использование раскрашенных сетей позволило уточнить численные характеристики процессов блокирования решетки с помощью рабочей нагрузки.

**Ключевые слова:** преобразование моделей, бесконечная сеть Петри, раскрашенная сеть Петри, вычислительная решетка, оценка производительности.

**Анотація.** Розроблено метод перетворення моделей телекомунікаційних систем наданих у вигляді нескінченних сіток Петрі в розфарбовані сітки Петрі. Метод призначений для оцінки часових і ймовірнісних характеристик телекомунікаційних мереж. Базовий фрагмент нескінченної сітки використовується як графічний шаблон при формуванні розфарбованих сіток, подальший процес перетворення моделі полягає в деталізації атрибутів елементів сіток, за допомогою абстрактних типів даних і функцій мови функціонального програмування CPN ML. Модель доповнюється вимірювальними фрагментами для оцінки продуктивності й якості обслуговування мережі. На основі попередніх оцінок обмеженості, живості і безпеки систем, виконаних шляхом аналізу нескінченних сіток Петрі, сформовані засоби оцінки кількісних характеристик поведінки систем. Побудову виконано на прикладі перетворення моделі прямокутної обчислювальної ґратки. Використання розфарбованих сіток дозволило уточнити кількісні показники процесів блокування ґратки за допомогою робочого навантаження.

**Ключові слова:** перетворення моделей, нескінченна сітка Петрі, розфарбована сітка Петрі, обчислювальна ґратка, оцінка продуктивності.

**Abstract.** A method has been developed for transforming models of telecommunication systems represented in the form of infinite Petri nets into colored Petri nets. The method is designed for the evaluation of timed and probability characteristics of telecommunication networks. The base fragment of an infinite net is used as a graphic pattern for the formation of colored net, the further process of model transformation consists in detailing the attributes of network elements, using abstract data types and functions of the functional programming language CPN ML. The model is complemented by measuring fragments for the evaluation of performance and network quality of service. Based on the preliminary estimates of boundedness, liveness and safeness of systems implemented by analyzing infinite Petri nets, facilities for estimating the quantitative characteristics of the systems behavior are developed. The construction is performed using an example of model transformation for the rectangular computing grid. The application of colored nets allowed clarifying the numerical characteristics of grid blocking processes via a workload.

**Key words:** transforming models, infinite Petri net, colored Petri net, computing grid, performance evaluation.

Классические сети Петри имеют неразличимые фишки и элементарные вершины двух типов – позиции и переходы. Обобщение классических сетей на бесконечные множества вершин является алгоритмически универсальной системой [1], однако непосредственное применение бесконечных сетей для оценки временных и вероятностных характеристик моделируемых систем затруднено; основной областью применения таких моделей является верификация поведения систем и протоколов аналитическими методами, например, основанными на линейных инвариантах, сифонах и ловушках [2].

Исследование свойств сложных моделей с учетом взаимодействия неограниченного количества устройств и их различных комбинаций изучено для моделей коммуникационных решеток в форме бесконечных сетей Петри с регулярной структурой [3, 4]. Исследование параметров качества обслуживания и производительности решеток связано с применением временных иерархических раскрашенных сетей Петри [5]. Актуальным остается вопрос надежности и безопасности коммуникационных систем связи [6], поэтому для решения поставленных задач необходим метод преобразования моделей.

**Целью настоящей статьи** является разработка метода преобразования моделей телекоммуникационных систем и сетей в форме бесконечных сетей Петри в раскрашенные сети. Построения выполнены на примере прямоугольной коммуникационной решетки, с коммутационным устройством, реализующим сквозную коммутацию пакетов. Метод предназначен для оценки параметров качества обслуживания и производительности модели решетки, преобразованной в форму раскрашенных сетей Петри, и выявления возможности возникновения тупиков, блокирующих работу вычислительной решетки, что влияет на безопасность сети.

**Описание метода преобразования моделей телекоммуникационных систем и сетей на основе бесконечных сетей Петри.** Метод базируется на основах теории раскрашенных сетей Петри [5], особенностях моделирующей системы CPN Tools [8], и использует методику композиции моделей [4].

*Первый шаг.* Выбор методов построения модели. В зависимости от способа построения модели используется метод нисходящей или восходящей разработки, иерархический или одноуровневый, прямого отображения или параметрический. Для корректного преобразования необходимо выбрать методы построения модели. В настоящей статье рассмотрим преобразование модели с использованием метода прямого отображения, восходящей разработки и иерархического принципа построения модели.

*Второй шаг.* Построение моделей нижнего уровня: коммуникационного и терминального устройств. Преобразование модели коммуникационного устройства состоит из нескольких этапов. Базовая модель устройства, используемая для построения решетки в форме бесконечной сети Петри, создается на отдельной странице модели. Назначаются типы позиций, начальная маркировка, объявляются необходимые дополнительные переменные и

функции. К переходам добавляются временные атрибуты, условия срабатывания и внутренние коды. Добавляется новая позиция, содержащая идентификатор устройства, и назначается как контактная позиция. Все позиции портов и их ограничителей назначаются как контактные позиции (порты) для последующей компоновки модели. Построенная модель клонируется по количеству устройств. Аналогичны этапы преобразования модели терминального устройства. Количество моделей нижнего уровня равно общему числу моделей коммуникационных и терминальных устройств.

*Третий шаг.* Построение модели верхнего уровня. Модель верхнего уровня состоит из двух частей: элементов сети Петри, которые участвуют в последующей компоновке модели, и элементов, которые выполняют функции только в модели верхнего уровня. При преобразовании элементов второй части выполняется стандартная процедура: назначаются типы позиций, начальная маркировка, вводятся дополнительные переменные и функции; на переходы устанавливаются атрибуты. При преобразовании остова модели необходимо:

- первое, построить количество позиций – сокетов, равное количеству портов подмоделей нижнего уровня из *Второго* шага;
- второе, для каждой подмодели нижнего уровня создать переход, заменяющий все элементы подмодели, и позицию, которая содержит уникальный идентификатор подмодели;
- третье, при композиции модели в форме раскрашенной сети Петри использовать методику, предложенную в [4].

*Четвертый шаг.* Построение моделей измерительных фрагментов или дополнение к преобразованным моделям элементов сети Петри для вычисления статистических характеристик. Это новые элементы модели, так как не предложен универсальный метод применения бесконечных сетей для оценки временных и вероятностных параметров моделируемых систем.

*Пятый шаг.* Компоновка модели. Компоновка модели в общем случае зависит от средств построения сложных моделей, предлагаемых моделирующей системой. В моделирующей системе CPN Tools для построения иерархической модели используется процедура подстановки перехода. При подстановке перехода следует: первое, установить соответствие перехода на модели верхнего уровня – подмодель; второе, установить соответствие порты подмодели – сокет на модели верхнего уровня.

*Шестой шаг.* Отладка модели.

*Седьмой шаг.* Проведение вычислительного эксперимента и обработка результатов.

Метод преобразования моделей телекоммуникационных систем и сетей, построенных в форме бесконечных сетей Петри, рассмотрим на примере модели прямоугольной коммуникационной решетки.

**Преобразование модели коммуникационного устройства.** Преобразования модели коммуникационного устройства рассмотрим на примере устройства с прямой передачей пакета из порта в порт, изученного в [7]. На рис. 1 представлены модели коммуникационного устройства с четырьмя портами, обеспечивающие сквозную коммутацию пакета из порта в порт. Модель коммуникационного устройства в форме сети Петри, рис. 1,а, выполняет следующие функции: обеспечивает полнодуплексный режим работы, осуществляет прямую передачу пакета из входного порта в выходной порт при наличии условия незанятости выходного порта. Модель состоит из 28 вершин, из которых 16 позиций и 12 переходов, где позиции описывают входные и выходные порты и их ограничители, переходы моделируют передачу пакета из входного порта в один из трех альтернативных выходных портов. При преобразовании модели исходные позиции и переходы не меняют своего логического назначения, а приобретают дополнительные атрибуты, которые позволят провести оценку временных характеристик модели.

Преобразованная модель коммуникационного устройства, представленная на рис. 1,б, состоит из 29 вершин, из которых 16 позиций и 12 переходов соответствуют исходной

модели и имеют те же обозначения. Различие заключается в следующем: индексы позиций и переходов в форме «строка-столбец» (например,  $pi:2-0.0$ ,  $po:1-6.3$ ,  $tic:4.2-5.3$ ) в исходной модели используются для обозначения элементов композиции модели решеток. В преобразованной модели для обозначения коммуникационного устройства в решетке введена дополнительная позиция  $ta$  типа  $an$  (node address), которая содержит адрес устройства, также как и в первом случае, состоящий из двух значений: номера строки и номера столбца элемента в решетке, например  $1(2,4)$  – четвертый элемент во второй строке.

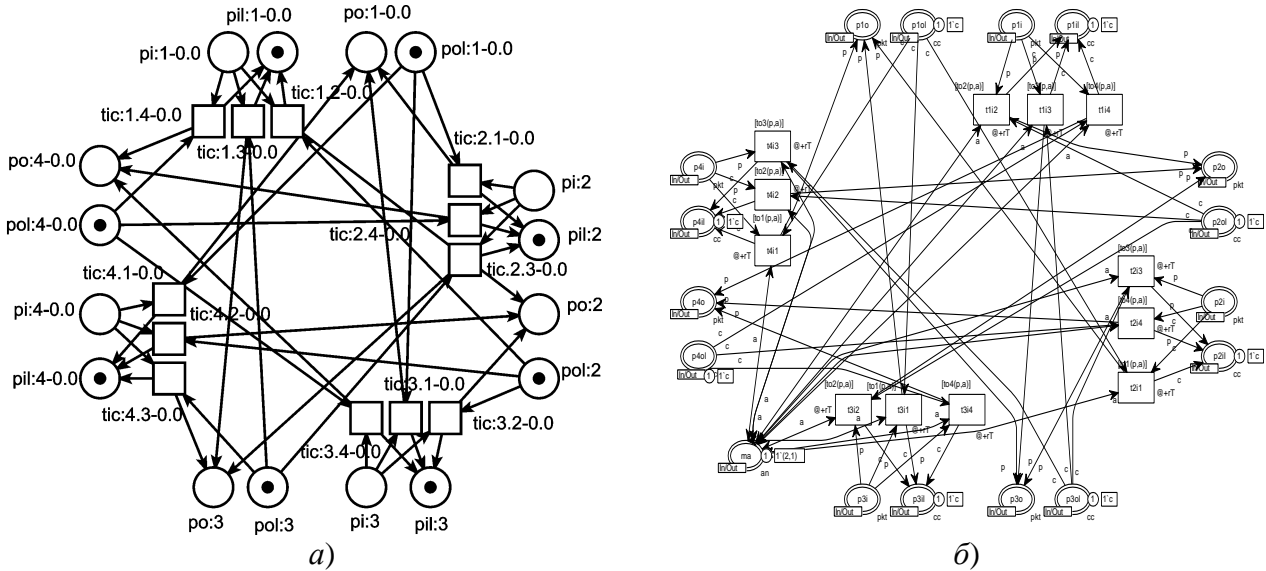


Рисунок 1 – Модель коммуникационного устройства со сквозной коммутацией пакета:  
 а) в форме сети Петри; б) в форме раскрашенной сети Петри

Опишем дополнительные атрибуты, введенные в преобразованную модель. Каждая позиция в раскрашенных сетях Петри обязательно должна иметь тип (или цвет  $colset$ ); остальные атрибуты: имя и начальная маркировка не обязательны. Позиции, описывающие входные и выходные порты ( $p*o$ ,  $p*i$ ), имеют тип  $pkt$ ; позиции, моделирующие ограничители портов ( $p*ol$ ,  $p*il$ ), тип  $cc$  и начальную маркировку  $1^c$ , обозначающую, что порт свободен. Описание основных типов, переменных, констант и функций представлено на рис. 2.

Все атрибуты перехода: имя, временной штамп, условия запуска и сегмент кода являются необязательными. Для адекватности модели реальным системам и исследования их характеристик введем на переходах временные штампы  $@+rT$ , моделирующие время передачи сообщения в сети и время передачи сообщения из входного порта в выходной порт. Для определения порта назначения полученного сообщения в зависимости от адреса назначения, введем функцию  $fun\ to^*(p:pkt,a:an)$  и добавим условие срабатывания каждого перехода  $[to^*(p,a)]$ , где  $*$  – это номер порта 1-4;  $p$  – входной пакет;  $a$  – адрес текущего коммуникационного устройства.

```

colset an = product INT * INT;
colset pkt = record da:an * sa:an * co:STRING * ts:INT timed;
colset cc = unit with c;
val rT=5;          val k1=2;          val k2=2;          var p:pkt;          var a,ta:an;
fun v1(p:pkt,a:an)=((#1(#da p))<(#1 a));
fun db1(p:pkt)=((#1(#da p))=0);
fun cb1(a:an)=((#1 a)=1);
fun nb1(p:pkt,a:an)=((#1 a)=(#1 (#da p)+1)) andalso ((#2 a)=(#2 (#da p)));
fun to1(p:pkt,a:an)=v1(p,a) andalso ((not (db1(p) andalso cb1(a))) or else (db1(p) andalso cb1(a) andalso nb1(p,a)))
    
```

Рисунок 2 – Описание типов, переменных, констант, функций модели



Таким образом, преобразованная модель коммуникационного устройства, представленная на рис. 1,б, для любого элемента решетки в отличии от модели, представленной на рис. 1,а, имеет одинаковые имена позиций и переходов, типы, временные характеристики, функции коммутации, что позволяет использовать иерархический принцип построения модели решетки.

**Преобразование модели прямоугольной решетки.** Рассмотрим преобразование модели решетки на примере прямоугольной коммуникационной решетки размера 2 x 2 с коммуникационным устройством, реализующим сквозную коммутацию пакетов, изученной в [7]. На рис. 3 представлены модели открытой коммуникационной решетки; на рис. 3,а – модель решетки в форме сети Петри; на рис. 3,б – в форме раскрашенной сети Петри.

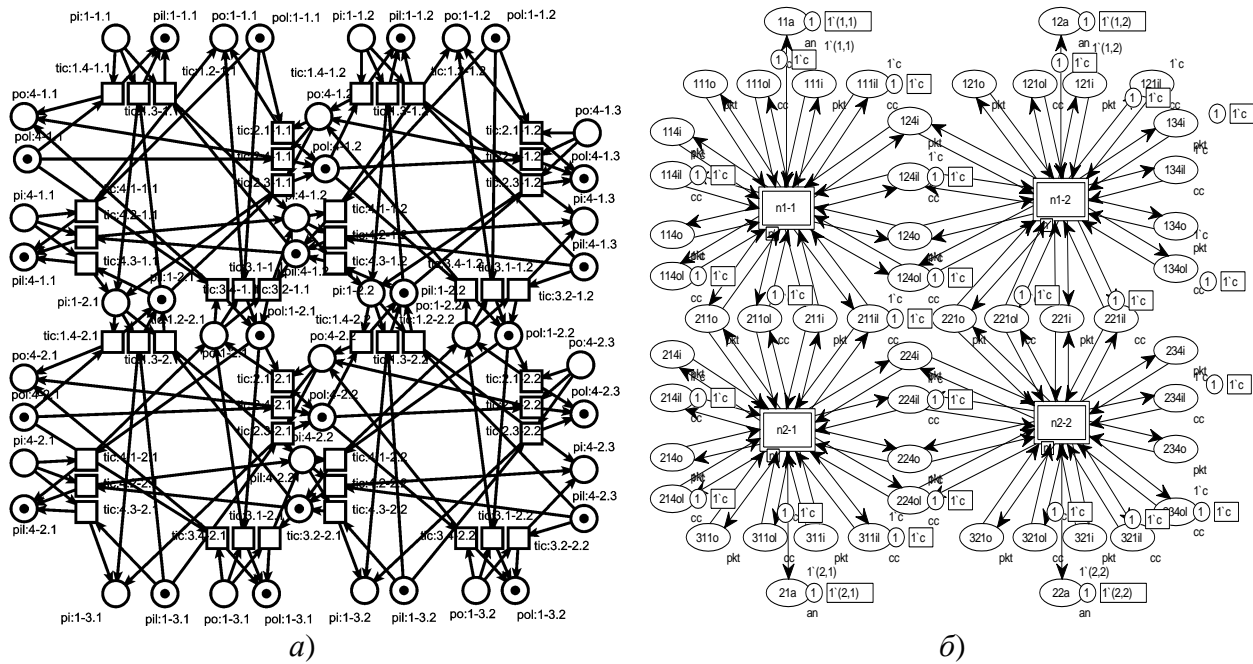


Рисунок 3 – Модель коммуникационной решетки:  
а) в форме сети Петри; б) в форме раскрашенной сети Петри

При построении композиции модели прямоугольной коммуникационной решетки в форме раскрашенной сети Петри используется методика, представленная в [3, 4] и примененная в [7]. Для нумерации элементов решетки (входных, выходных портов и их ограничителей, коммуникационных узлов и терминальных устройств, представленных подстраницами модели), используются индексы  $(i, j)$ , где индекс  $i$  – номер строки решетки; индекс  $j$  – последовательный номер устройства слева направо на  $i$ -м уровне.

Модели телекоммуникационных систем содержат большое количество вершин сети Петри (100 и более), поэтому в [4] предложено использовать генераторы сетей Петри для построения моделей в форме классических сетей Петри. В раскрашенных сетях Петри [5] для представления сложных объектов используется иерархический принцип построения модели, количество уровней не ограничено. В преобразованной модели решетки два уровня иерархии: первый – главная страница модели, представленная на рис. 3,б; второй уровень – модели терминальных и сетевых устройств. На главной странице модели позиции, моделирующие порты и их ограничители, соответствуют аналогичным позициям модели решетки, представленной на рис. 3,а. Это контактные позиции, которые используются для композиции модели коммуникационной решетки и присоединения подмоделей, каждой позиции присваивается тип *pkt* или тип *cc*. Переходы, имена которых содержат индексы присоединенных устройств и теги, описывают вложенные подмодели. Например, узел с индексами (1,2) описывается переходом с именем  $n1-2$  и тегом  $n2$ , терминальная сеть на правой стороне решетки

с индексами (3,5) описывается переходом с именем  $n3-5$  и тегом  $n3$ . Для корректного объединения главной страницы и подмодели, каждый узел описывается дополнительной контактной позицией, которая содержит уникальный адрес устройства. Например, позиция с именем  $21a$  типа  $an$  (node address) содержит адрес коммуникационного устройства, первое значение которого равно 2, второе 1. Любой элемент раскрашенной сети Петри может описывать подмодель, но в CPN Tools [8] используется только подстановка переходов.

**Преобразование модели терминального устройства.** Для оценки параметров качества обслуживания и производительности исследуются закрытые решетки, поэтому к краевым портам добавляются модели терминальных устройств. На рис. 5 представлены модели терминальных устройств; на рис. 5,а – простейшие с отражением пакета; на рис. 5,б – с генерацией пакета по выбранному закону распределения случайных величин, с адресами отправителя и получателя для последующей коммутации.

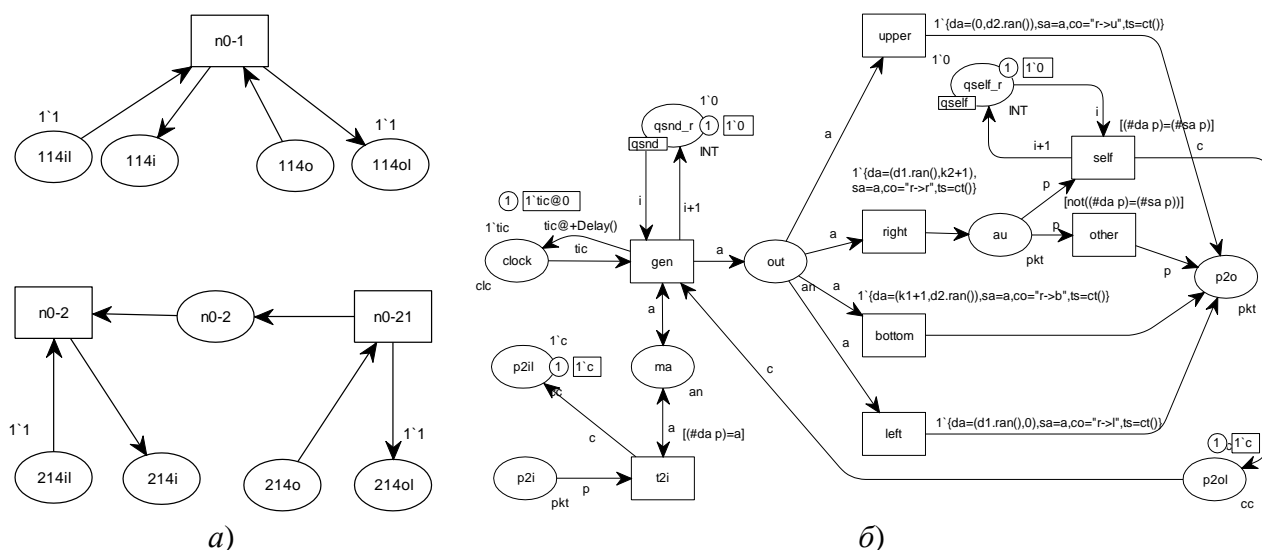


Рисунок 4 – Модели терминальных устройств: а) с отражением пакета; б) с генерацией пакета

При использовании моделей терминальных устройств, представленных на рис. 5,а, количество пакетов в решетке неизменно, пакеты не поглощаются (не обрабатываются) и новые не генерируются, нагрузка на сеть постоянна. Процедура преобразования проста: позициям, описывающим промежуточные буферы, входные и выходные порты присваивается тип  $pkt$ ; позициям, моделирующим ограничители портов, тип  $cc$  и начальная маркировка  $1^c$ ; переходам присваивается временной атрибут, который равен времени передачи сообщения из порта в порт. Использовать эти модели для расчета характеристик решетки не целесообразно, так как они не содержат вычислительной ценности. Поэтому для дальнейших исследований будем использовать модели терминальных устройств, предложенные в [6] и представленные на рис. 5,б. Модели измерительных фрагментов для расчета характеристик могут быть представлены отдельными подмоделями или добавлены как элементы сети в модели терминальных, сетевых устройств и главной страницы модели.

**Исследование характеристик модели замкнутой прямоугольной решетки.** Для изучения поведения решетки в условиях слабой, средней и пиковой нагрузки, оценки влияния параметров на производительность и качество обслуживания решетки в [6] были изучены базовые параметры модели и основные характеристики пушек. Модели пушек, построенные для имитации злонамеренного трафика, и их взаиморасположение выявили уязвимость структур решетки при низкой рабочей нагрузке и дополнительной нагрузке менее чем 5%. Исследуем характеристики преобразованной модели замкнутой прямоугольной решетки размером  $4 \times 4$  в условиях рабочей нагрузки для проверки

корректности предложенного метода и его адекватности. Интенсивность рабочей нагрузки  $wl$  распределена по равномерному закону распределения (указывается временной интервал формирования пакета), производительность коммуникационного устройства постоянная величина и равна временному параметру  $rT = 5$ . Расчеты проводятся в единицах модельного времени MTU. В табл. 1 приведены результаты вычислительного эксперимента, показано, что решетка приходит в тупик при интенсивности рабочей нагрузки  $wl = 30^*$ , при уменьшении этого параметра, возрастает среднее время доставки пакета, и решетка приходит в тупик на малом интервале модельного времени.

Таблица 1 – Характеристики качества обслуживания и производительности решетки

Интенсивность рабочей нагрузки	Шаг	Время	Среднее время доставки пакета	Производительность решетки (пакет/MTU)	Количество отправленных пакетов	Количество принятых пакетов	Количество пакетов в решетке
100...150	1000000	984618	20	0,12	118144	118140	4
50...100	1000000	590393	20	0,19	117933	117927	6
30...50	1000000	314926	20	0,38	118151	118144	7
30...40	1000000	275277	21	0,43	117983	117974	9
30...30	1000000	236140	21	0,50	118068	118054	14
30...30*	964331	227790	21	0,49	113934	113889	45
20...30*	374528	73949	22	0,59	44208	44159	49
5...15*	19041	1693	29	1,29	2259	2206	53

На рис. 5 представлен полный тупик в условиях рабочей нагрузки ( $wl = 20...35$ ,  $rT = 5$ ,  $Step = 1132726$ ,  $Time = 10941$ ) в модели замкнутой прямоугольной решетки размером  $4 \times 4$ .

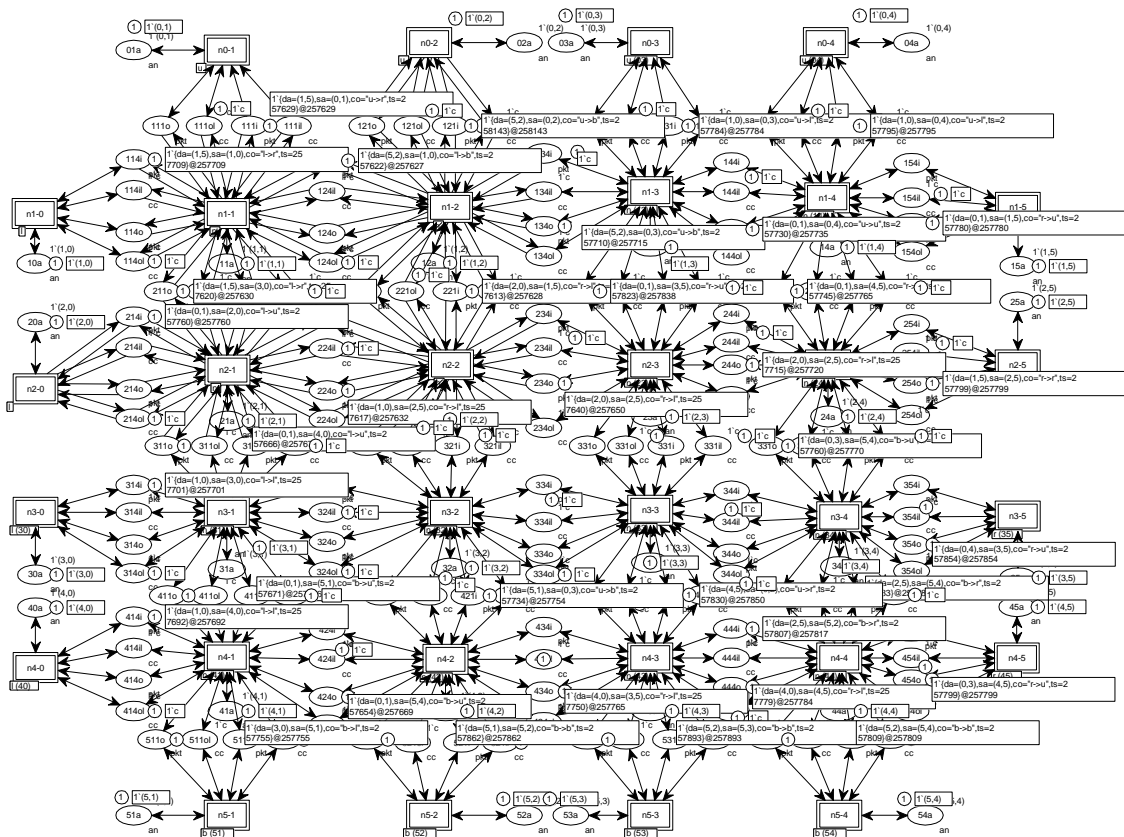


Рисунок 5 – Полный тупик в модели замкнутой прямоугольной решетки размером  $4 \times 4$

В большинстве случаев тупик означает, что входные порты некоторых коммуникационных устройств содержат сообщения, адреса назначения которых одинаковы, и которые не могут быть перенаправлены в выходной порт, так как выходной канал занят передачей сообщения, которое в свою очередь не может быть принято другим устройством по тем же причинам. Общее количество сообщений в решетке при полном тупике больше или равно 40 пакетам.

Разработан метод преобразования моделей телекоммуникационных систем и сетей, представленных в форме бесконечных сетей Петри, в раскрашенные сети Петри. Метод применен для преобразования модели прямоугольной коммуникационной решетки, с коммутационным устройством, реализующим сквозную коммутацию пакетов. Преобразованная модель представлена в форме иерархической раскрашенной сети Петри, при построении которой использован метод прямого отображения. При исследовании характеристик преобразованной модели замкнутой прямоугольной решетки размером 4 x 4 в условиях рабочей нагрузки выявлена возможность возникновения тупиков, блокирующих работу вычислительной решетки, при производительности решетки не более 30%.

Направлением дальнейших исследований является развитие метода преобразования моделей телекоммуникационных сетей и систем, построенных в форме бесконечных сетей Петри, в реентерабельные модели раскрашенных сетей Петри.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Zaitsev D.A. Universality in Infinite Petri Nets. Proceedings of 7th International Conference, MCU 2015, Famagusta, North Cyprus, September 9-11, 2015, Lecture Notes in Computer Science, Volume 9288. – P.180-197.
2. ZhiWu Li, MengChu Zhou. Deadlock Resolution in Automated Manufacturing Systems: A Novel Petri Net Approach. Springer Publishing Company, Incorporated, 2009. – 156 p.
3. Shmeleva T.R. Analysis of square communication grids via infinite Petri nets / T.R. Shmeleva, D.A. Zaitsev, I.D. Zaitsev // Сборник научных трудов ОНАС им. А.С. Попова. – 2009. – № 1. – С. 27-35.
4. Zaitsev D.A., Zaitsev I.D., Shmeleva T.R. Infinite Petri Nets as Models of Grids (p. 187-204). Chapter 19 in Mehdi Khosrow-Pour (Ed.) Encyclopedia of Information Science and Technology, Third Edition (10 Volumes). IGI-Global: USA, 2014.
5. Jensen, K., Kristensen, L.M. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany. – 2009. – 384 p.
6. D. A. Zaitsev , T. R. Shmeleva, W. Retschitzegger, B. Pröll Security of grid structures under disguised traffic attacks. Cluster Computing. – 2016. – 19(3). – P. 1183–1200.
7. Шмельёва Т.Р. Моделирование технологии сквозной коммутации бесконечными сетями Петри / Т.Р.Шмельёва // Сборник научных трудов ОНАС им. А.С. Попова. – 2016. – № 2. – С. 99-106.
8. Моделирующая система CPN Tools <http://www.cpntools.org>

#### REFERENCES:

1. Zaitsev D.A. Universality in Infinite Petri Nets. Proceedings of 7th International Conference, MCU 2015, Famagusta, North Cyprus, September 9-11, 2015, Lecture Notes in Computer Science, Volume 9288. – P.180-197.
2. ZhiWu Li, MengChu Zhou. Deadlock Resolution in Automated Manufacturing Systems: A Novel Petri Net Approach. Springer Publishing Company, Incorporated. 2009. – 156 p.
3. Shmeleva T.R. Analysis of square communication grids via infinite Petri nets / T.R. Shmeleva, D.A. Zaitsev, I.D. Zaitsev // Proceedings of the A. S. Popov ONAT. – 2009. – № 1. – P. 27-35.
4. Zaitsev D.A., Zaitsev I.D., Shmeleva T.R. Infinite Petri Nets as Models of Grids (p. 187-204). Chapter 19 in Mehdi Khosrow-Pour (Ed.) Encyclopedia of Information Science and Technology, Third Edition (10 Volumes). IGI-Global: USA, 2014.
5. Jensen, K., Kristensen, L.M. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany. – 2009. – 384 p.
6. D. A. Zaitsev , T. R. Shmeleva, W. Retschitzegger, B. Pröll Security of grid structures under disguised traffic attacks. Cluster Computing.– 2016. – 19(3). – P. 1183–1200.
7. Shmeleva T.R. Modeling cut-through switching by infinite Petri nets / T.R. Shmeleva // Proceedings of the O. S. Popov ONAT. – 2016. – № 2. – P. 99-106.
8. Modelling system CPN Tools <http://www.cpntools.org>.