

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СКВОЗНОЙ КОММУТАЦИИ БЕСКОНЕЧНЫМИ СЕТЯМИ ПЕТРИ

Шмельёва Т.Р.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
tishtri@rambler.ru*

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НАСКРІЗНОЇ КОМУТАЦІЇ НЕСКІНЧЕННИМИ СІТКАМИ ПЕТРИ

Шмельова Т.Р.

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

MODELING CUT-THROUGH SWITCHING BY INFINITE PETRI NETS

Shmeleva T.R.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.
tishtri@rambler.ru*

Аннотация. Выполнен анализ технологии сквозной коммутации пакетов с помощью моделей, построенных в форме бесконечных сетей Петри. Построена модель коммуникационного устройства со сквозной коммутацией пакетов. Выполнена композиция прямоугольной коммуникационной решетки произвольного размера. Прямое и двойственное параметрические описания сетей Петри с регулярной структурой применены для спецификации бесконечных систем линейных уравнений, вычисления инвариантов позиций и переходов сети Петри, верификации протоколов телекоммуникационных систем с прямоугольной ячейкой. Показано, что в прямоугольных коммуникационных решетках произвольного размера с коммуникационным устройством, реализующим сквозную коммутацию пакетов, возникают взаимные блокировки устройств и сложные тупики.

Ключевые слова: сквозная коммутация, бесконечная сеть Петри, вычисления на решетках, параметрическое описание, прямоугольная решетка.

Анотація. Виконано аналіз технології наскрізної комутації пакетів за допомогою моделей, побудованих у формі нескінченних сіток Петрі. Побудована модель комунікаційного пристрою з наскрізною комутацією пакетів. Виконана композиція прямокутної комунікаційної ґратки довільного розміру. Прямий і двоїстий параметричний опис сітки Петрі з регулярною структурою застосований для специфікації нескінченних систем лінійних рівнянь, обчислення інваріантів позицій і переходів сітки Петрі, верифікації протоколів телекомунікаційних систем з прямокутною коміркою. Показано, що в прямокутних комунікаційних ґратках довільного розміру з комунікаційним пристроєм, що реалізує наскрізну комутацію пакетів, виникають взаємні блокування пристроїв і складні тупики.

Ключові слова: наскрізна комутація, нескінченна сітка Петрі, обчислення на ґратках, параметричний опис, прямокутні ґратки.

Abstract. The analysis of cut-through switching technology, using models built in the form of infinite Petri nets, has been implemented. A model of a communication device with cut-through switching was built. The communication rectangular grid of an arbitrary size was composed. Direct and dual parametric descriptions of Petri nets with a regular structure have been used for the specification of infinite systems of linear equations, computing invariants of Petri net places and transitions, verification of telecommunication systems protocols with a rectangular cell. It is shown that in the rectangular communication grids of an arbitrary size with a communication device that implements cut-through switching, there are mutual blockings of devices and complex deadlocks.

Key words: cut-through switching, infinite Petri net, grid computing, parametric description, rectangular grid.

Обязательная буферизация пакетов традиционно используемая в ряде серийных коммутаторов-маршрутизаторов является существенным препятствием на пути повышения качества обслуживания. Минимальное время доставки пакета в ней ограничено произведением количества промежуточных узлов на время передачи пакета в канале. Сквозная передача пакетов [1, 2] снимает это ограничение таким образом, что в указанном произведении участвует лишь головная часть пакета, содержащая адрес назначения. Например, для технологии Ethernet адресная часть примерно в 250 раз меньше общей длины пакета. Таким образом, технология сквозной передачи пакетов имеет значительные резервы для повышения качества обслуживания.

Аналізу різних аспектів сквозної комутації присвячені недавні публікації в провідних світових журналах [1] в той час як телекомунікаційні компанії надають готові промислові рішення [2]. Однак, попередні оцінки показують, що технологія сквозної передачі може успадкувати деякі негативні ефекти, властиві традиційній обов'язковій буферизації пакетів.

Целью настоящей статьи является дальнейшее развитие методов анализа бесконечных сетей Петри [3] для оценки характеристик решеток с коммутационным устройством, реализующим сквозную коммутацию пакетов. Методы предназначены для использования, как в процессе проектирования вычислительных решеток, так и в разработке новых телекоммуникационных устройств. Ввиду выявленной возможности возникновения тупиков блокирующих работу вычислительных решеток, возникают перспективы применения моделей в программных средствах управления и обеспечения безопасности сети.

Применение коммутаторов со сквозной коммутацией пакетов в телекоммуникациях. В современных телекоммуникационных системах преобладают два основных метода коммутации пакетов: первый – с обязательной буферизацией пакета SAF (store-and-forward) и второй – без буферизации (cut-through), еще одно популярное название которого – «на лету» (on-the-fly). В меньшей степени в сетях используются гибридные коммутаторы, которые могут автоматически переключаться из режима сквозной коммутации в режим SAF и наоборот. Переключение между методами коммутации основано на определении производительности и целостности пакетов. Большинство современных коммутаторов поддерживают одновременно разные скорости передачи пакета, в некоторых коммутаторах порты автоматически настраиваются на скорость передачи подключенного к порту сегмента.

Первая технология SAF, традиционная для большинства сетей, с обязательной буферизацией пакета предусматривает передачу пакета отправителю только после полного получения пакета и проверки контрольной суммы (CRC). Пакет отбрасывается если: не проходит проверку контрольной суммы; короче 64 байта или длиннее 1518 байт. При использовании данного метода коммутации время задержки увеличивается пропорционально размеру пакета, так как необходимо время для получения и обработки пакета целиком.

Технология коммутации «на лету» буферизует только головную часть пакета, а именно 6-байтовый адрес получателя. Коммутаторы данного типа не производят селекцию пакетов, поэтому считаются самыми быстрыми в своем классе, однако недостаток данного типа коммутатора состоит в том, что он передает любые пакеты, в том числе с ошибочной контрольной суммой.

В некоторых коммутаторах cut-through используется метод коммутации ICS (interim cut-through switching – промежуточная коммутация на лету) [2], который фильтрует пакеты с длиной меньше 64 байта. До тех пор, пока коммутатор не принял первые 512 бит пакета, он не начинает передавать пакет в соответствующий порт, если пакет заканчивается раньше, чем заполнился буфер, то содержимое буфера автоматически отбрасывается.

Коммутаторы cut-through [2] в первую очередь используются в центрах обработки данных (ЦОД), где необходимо обеспечивать непрерывную передачу большого количества трафика с минимальными задержками. Наличие разнообразных портов, в том числе на скорости до 100 Гбит/с, минимизация задержек за счёт архитектурных особенностей и различные схемы работы внутренней шины реализуют непрерывную передачу больших объёмов сетевого трафика.

Несмотря на свои достоинства, коммутаторы данного типа не являются полноценной заменой коммутаторов SAF, которые лидируют в корпоративных сетях. Однако, функциональности современных коммутаторов cut-through [2] достаточно для большинства задач, решаемых в этих сетях. Поэтому, после тщательного изучения требований к сети можно использовать коммутаторы cut-through в корпоративной сети.

Модель коммуникационного устройства с прямой передачей пакета из порта в порт. В телекоммуникационных сетях одной из основных составляющих является активное оборудование, в частности коммутаторы. Модели прямоугольных коммуникационных решеток, базовым элементом которых является модель коммутатора с обязательной буферизацией, изучены в [3-5]. Рассмотрим построение модели коммутатора с прямой передачей пакета из порта в порт.

На рис.1 представлены модели коммуникационного устройства с четырьмя портами. Модель коммуникационного устройства с принудительной буферизацией, рис. 1,а, состоит из 36 вершин, обеспечивает для сетей с коммутацией пакетов следующие функции: буферизацию с ограничениями на размер буферов, перенаправление пакетов между портами, полнодуплексный режим работы.

Модель коммуникационного устройства, представленная на рис. 1,б, состоит из 28 вершин, осуществляет прямую передачу пакета из порта в порт, обеспечивая сквозную коммутацию.

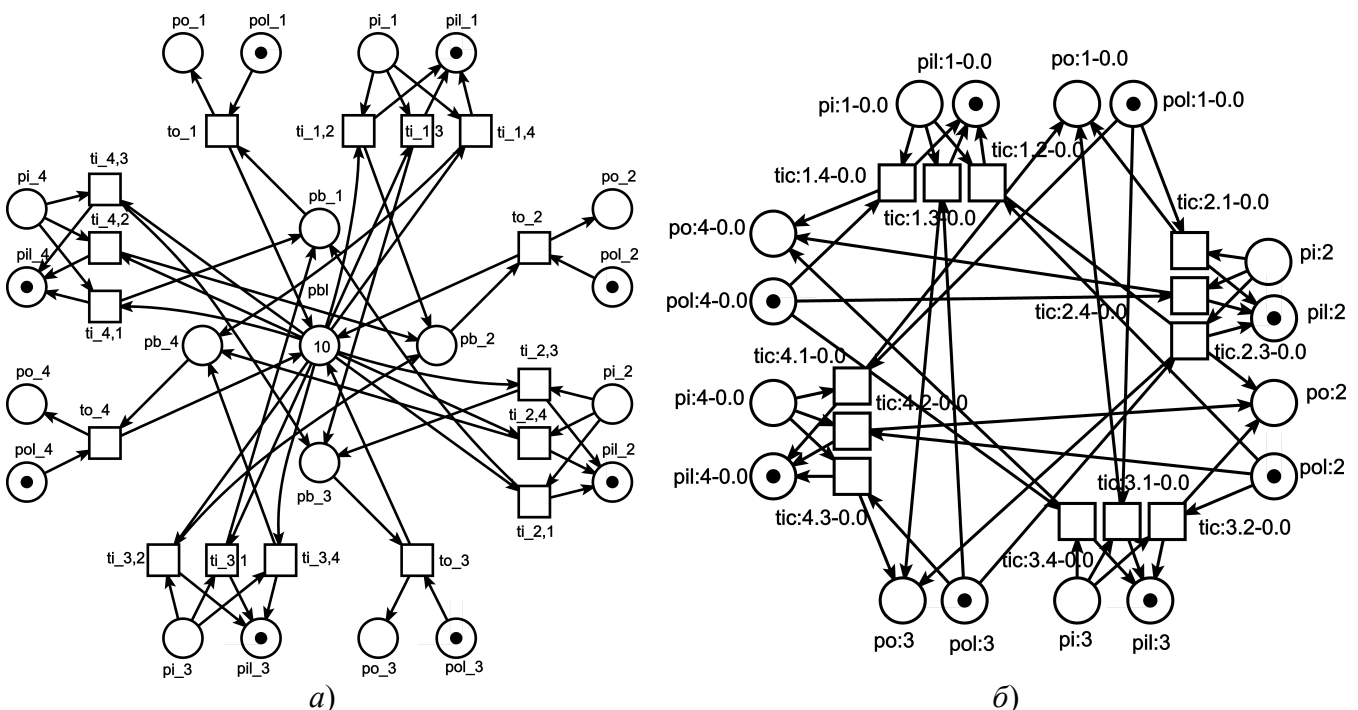


Рисунок 1 – Модель коммуникационного устройства с четырьмя портами: а) с принудительной буферизацией; б) с прямой передачей из порта в порт

Каждый порт коммутатора представлен парой позиций, например, для четвертого порта позиции $po:4-0.0$, $pol:4-0.0$ моделируют выходной буфер порта и ограничение его размера соответственно; позиции $pi:4-0.0$, $pil:4-0.0$ моделируют входной буфер порта и

ограничение его размера, размеры буферов портов равны единице. Передачу пакетов, поступивших во входной канал 4 порта, в соседние выходные порты, моделируют альтернативные переходы, которые перечисляют возможные варианты передачи пакета: $tic:4.1-0.0$ – передача пакета из четвертого порта на первый; $tic:4.2-0.0$ – передача пакета из четвертого порта во второй; $tic:4.3-0.0$ – в третий порт соответственно. Индексы позиций и переходов в форме «строка-столбец» (например, 0.0) будут использоваться для обозначения элементов композиции моделей прямоугольных решеток.

Параметрическое описание (1) модели 4-портового коммуникационного устройства, изображенного на рис. 1, б, представим в параметрической форме (2) для модели с любым количеством портов, которая будет использоваться для дальнейшей композиции моделей решеток. Параметром является переменная np , обозначающая произвольное количество портов коммуникационного устройства.

$$((tic_{u,v} : pi_u, pol_v \rightarrow pil_u, po_v), v = \overline{1,4}, v \neq u), u = \overline{1,4}). \quad (1)$$

В параметрических описаниях (1) и (2) каждый переход сети Петри описывается перечислением его входных позиций, которые находятся слева от знака “ \rightarrow ”, и выходных позиций, которые находятся справа от знака.

$$((tic_{u,v} : pi_u, pol_v \rightarrow pil_u, po_v), v = \overline{1,np}, v \neq u), u = \overline{1,np}). \quad (2)$$

Для вычисления инвариантов сетей Петри и нахождения свойств моделей любого размера необходимо построить бесконечные системы линейных уравнений, для представления которых используется параметрическое описание.

Для построения композиции моделей прямоугольной коммуникационной решетки будем использовать графический формат сетей Петри в системе Tina [6] и прямые индексы, например, $po:4-1.2$ – позиция, которая описывает четвертый выходной порт коммуникационного устройства с индексом (1,2). В параметрическом описании моделей будем использовать нижние и верхние индексы, например, позиция $pi_1^{i,j}$ описывает входной порт с номером один коммуникационного устройства с индексом (i, j) .

Композиция и анализ моделей прямоугольной коммуникационной решетки. Для построения композиций моделей прямоугольной коммуникационной решетки используется методика, представленная в [3, 4]. Введем нумерацию элементов решетки, которые являются моделями коммуникационного устройства, используя пару индексов (i, j) , где индекс i – номер строки решетки или, иначе, последовательный номер уровня коммутатора сверху вниз; индекс j – последовательный номер коммутатора слева направо на i -м уровне. Пример модели открытой прямоугольной решетки размера 2×2 показан на рис. 2.

Параметрическое описание решетки размером $k \times k$, где $k > 0$, представлено в (3) и содержит 12 строк. В отличие от [3], в параметрическом описании (3) меньше строк, перечислены только переходы, перенаправляющие пакеты из порта в порт, поскольку пакеты перенаправляются напрямую в выходной порт без буферизации.

Следующим шагом в исследовании бесконечных сетей Петри с регулярной структурой [3, 4] является нахождение свойств *ограниченности* и *консервативности*, наличие которых является необходимым для модели телекоммуникационного протокола. Методы анализа представлены в [3, 4], задача сводится к нахождению инвариантов позиций сети Петри, в представленной статье посредством построения и решения бесконечных систем линейных алгебраических уравнений.

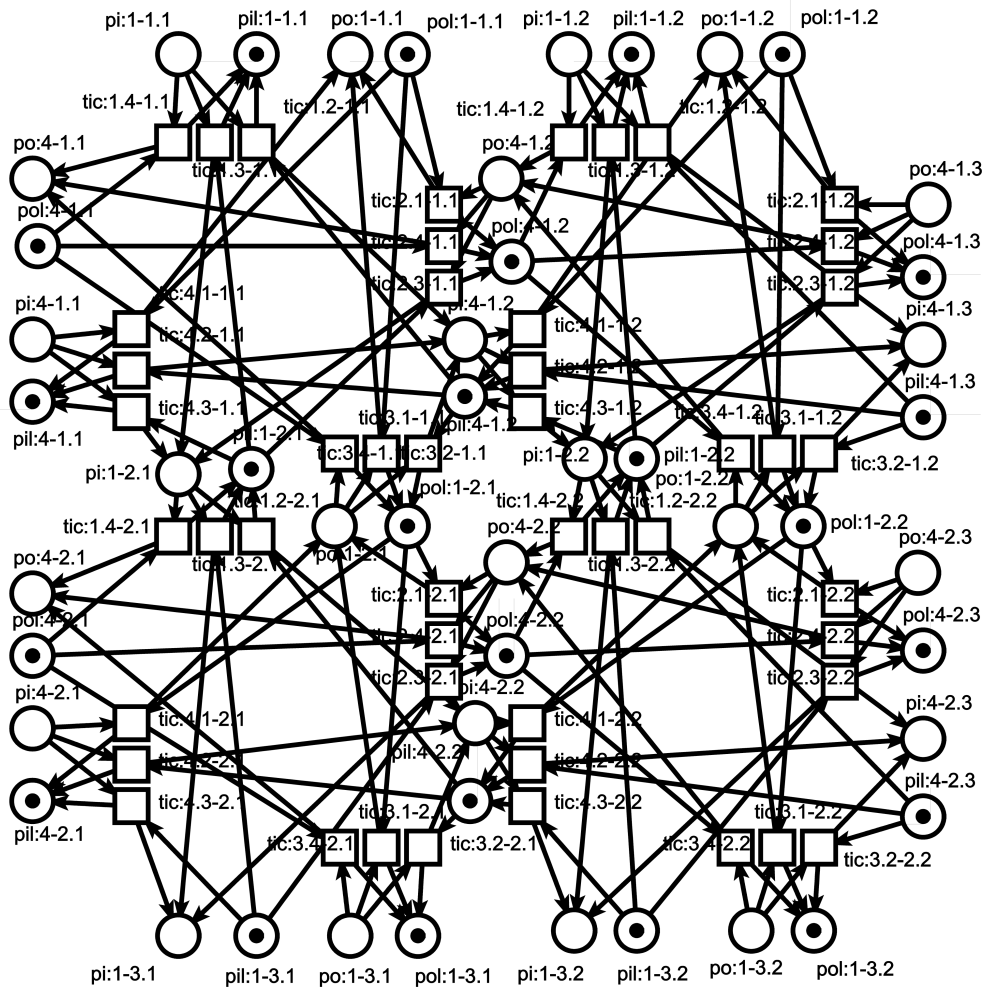


Рисунок 2 – Модель открытой прямоугольной решетки размером 2 x 2

Для построения бесконечной системы уравнений используются правила композиции и параметрическое описание решетки. Для каждого перехода строится уравнение, представляющее собой равенство сумм входных и выходных позиций перехода. Пример для первых трех переходов из описания (3) представлен в (4).

$$\left(\begin{array}{l}
 tic_{1,2}^{i,j} : pi_1^{i,j}, pil_4^{i,j+1} \rightarrow pil_1^{i,j}, pi_4^{i,j+1}, \\
 tic_{1,3}^{i,j} : pi_1^{i,j}, pil_1^{i+1,j} \rightarrow pil_1^{i,j}, pi_1^{i+1,j}, \\
 tic_{1,4}^{i,j} : pi_1^{i,j}, pol_4^{i,j} \rightarrow pil_1^{i,j}, po_4^{i,j}, \\
 tic_{2,1}^{i,j} : pol_1^{i,j}, po_4^{i,j+1} \rightarrow pol_1^{i,j}, pol_4^{i,j+1}, \\
 tic_{2,3}^{i,j} : pil_1^{i+1,j}, po_4^{i,j+1} \rightarrow pi_1^{i+1,j}, pol_4^{i,j+1}, \\
 tic_{2,4}^{i,j} : pol_4^{i,j}, po_4^{i,j+1} \rightarrow po_4^{i,j}, pol_4^{i,j+1}, \\
 tic_{3,1}^{i,j} : pol_1^{i,j}, po_1^{i+1,j} \rightarrow po_1^{i+1,j}, pol_1^{i+1,j}, \\
 tic_{3,2}^{i,j} : pil_4^{i,j+1}, po_1^{i+1,j} \rightarrow pi_4^{i,j+1}, pol_1^{i+1,j}, \\
 tic_{3,4}^{i,j} : pol_4^{i,j}, po_1^{i+1,j} \rightarrow po_4^{i,j}, pol_1^{i+1,j}, \\
 tic_{4,1}^{i,j} : pi_4^{i,j}, pol_1^{i,j} \rightarrow pil_4^{i,j}, po_1^{i,j}, \\
 tic_{4,2}^{i,j} : pi_4^{i,j}, pil_4^{i,j+1} \rightarrow pil_4^{i,j}, pi_4^{i,j+1}, \\
 tic_{4,3}^{i,j} : pi_4^{i,j}, pil_1^{i+1,j} \rightarrow pil_4^{i,j}, pi_1^{i+1,j}.
 \end{array} \right) \quad i = \overline{1,k}, \quad j = \overline{1,k}. \quad 3)$$

Уравнение для перехода $tic_{1,2}^{i,j}$ имеет вид: $tic_{1,2}^{i,j} : xpi_1^{i,j} + xpil_4^{i,j+1} = xpil_1^{i,j} + xpi_4^{i,j+1}$, где $xpi_1^{i,j}$ и $xpil_4^{i,j+1}$ – входные позиции перехода; $xpil_1^{i,j}$ и $xpi_4^{i,j+1}$ – выходные позиции; после преобразования уравнение имеет следующий вид: $tic_{1,2}^{i,j} : -xpi_1^{i,j} - xpil_4^{i,j+1} + xpil_1^{i,j} + xpi_4^{i,j+1} = 0$. Полученный пакет передается с первого порта текущего устройства (i, j) на второй порт текущего устройства (i, j), позиции которого совмещены с позициями четвертого порта следующего устройства ($i, j+1$) по ранее описанным правилам композиции модели.

$$\begin{aligned} tic_{1,2}^{i,j} : -xpi_1^{i,j} - xpil_4^{i,j+1} + xpil_1^{i,j} + xpi_4^{i,j+1} &= 0, \\ tic_{1,3}^{i,j} : -xpi_1^{i,j} - xpil_1^{i+1,j} + xpil_1^{i,j} + xpi_1^{i+1,j} &= 0, \\ tic_{1,4}^{i,j} : -xpi_1^{i,j} - xpol_4^{i,j} + xpil_1^{i,j} + xpo_4^{i,j} &= 0, \quad i = \overline{1, k}, \quad j = \overline{1, k}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для поиска инвариантов позиций сети Петри используют бесконечные диофантовые линейные однородные системы уравнений вида (4), решение требуется найти в целых неотрицательных числах. Универсальные методы решения указанных систем в настоящее время неизвестны, поэтому использована методика композиции параметрического решения уравнения [4]. Параметрическое решение для инвариантов позиций имеет вид (5) и содержит 6 параметрических решений. Параметрические решения указаны перечислением ненулевых значений, при этом все ненулевые значения равны единице.

$$\left(\begin{array}{l} (pi_1^{i,j}, pil_1^{i,j}), i = \overline{1, k+1}, j = \overline{1, k}; \\ (pi_4^{i,j}, pil_4^{i,j}), i = \overline{1, k}, j = \overline{1, k+1}; \\ (po_1^{i,j}, pol_1^{i,j}), i = \overline{1, k+1}, j = \overline{1, k}; \\ (po_4^{i,j}, pol_4^{i,j}), i = \overline{1, k}, j = \overline{1, k+1}; \\ (((pi_1^{i,j}, po_1^{i,j}), i = \overline{1, k+1}, j = \overline{1, k}), ((pi_4^{i,j}, po_4^{i,j}), i = \overline{1, k}, j = \overline{1, k+1})); \\ (((pil_1^{i,j}, pol_1^{i,j}), i = \overline{1, k+1}, j = \overline{1, k}), ((pil_4^{i,j}, pol_4^{i,j}), i = \overline{1, k}, j = \overline{1, k+1})) \end{array} \right). \quad (5)$$

Например, количество решений для решетки размером 2x2 равно 26, по 6 решений формируют первые четыре строки, в каждом решении по два элемента; пятая и шестая строки формируют по одной строке с переменным числом единичных элементов.

Для вычисления инвариантов переходов и нахождения свойства *стационарной повторяемости* сети Петри изучаются замкнутые решетки. Замкнутая модель решетки получается путем присоединения к ней терминальных устройств, модели терминальных устройств изучены в [3, 4]. Двойственное параметрическое описание решетки [5] используется для построения бесконечной системы уравнений и нахождения инвариантов переходов. Пример двойственного параметрического описания узла решетки, представленного на рис. 1,б, к которому добавили простые модели терминальных устройств, иначе, замкнутого узла, имеет форму (6).

$$\left(\left(\begin{array}{l} (po_u : (tic_{v,u}, v = \overline{1,4}, v \neq u) \rightarrow te_u) \\ (pol_u : te_u \rightarrow (tic_{v,u}, v = \overline{1,4}, v \neq u)) \\ (pi_u : te_u \rightarrow (tic_{u,v}, v = \overline{1,4}, v \neq u)) \\ (pil_u : (tic_{u,v}, v = \overline{1,4}, v \neq u) \rightarrow te_u) \end{array} \right), u = \overline{1,4} \right). \quad (6)$$

Присоединенные граничные переходы (простые модели терминальных устройств) называются te_u , где индекс u равен номеру внутреннего порта устройства. Первые две строки (6) описывают множество позиций, моделирующих выходные буферы портов и ограничение их размеров, третья и четвертая строки описывают множество позиций, моделирующих входные буферы портов и ограничение их размеров, каждая строка описывает четыре позиции.

Модель замкнутой прямоугольной решетки размером 4×4 с усеченными устройствами на краях показана на рис. 3. Усеченное устройство на краях является наиболее реалистичной разновидностью модели для узлов решетки, совмещающих коммутацию и обработку пакетов. Граничные порты отсекаются вместе с другими вершинами, предполагающими использование отсутствующих портов, таким образом, появляется восемь разновидностей граничных устройств: по одному устройству для каждой из четырех границ и четыре угловых устройства. Устройства на границах имеют три порта, угловые устройства содержат два порта. Например, верхнее левое угловое устройство содержит порты с номерами 2, 3; устройство верхней границы содержит порты с номерами 4, 2, 3 и так далее.

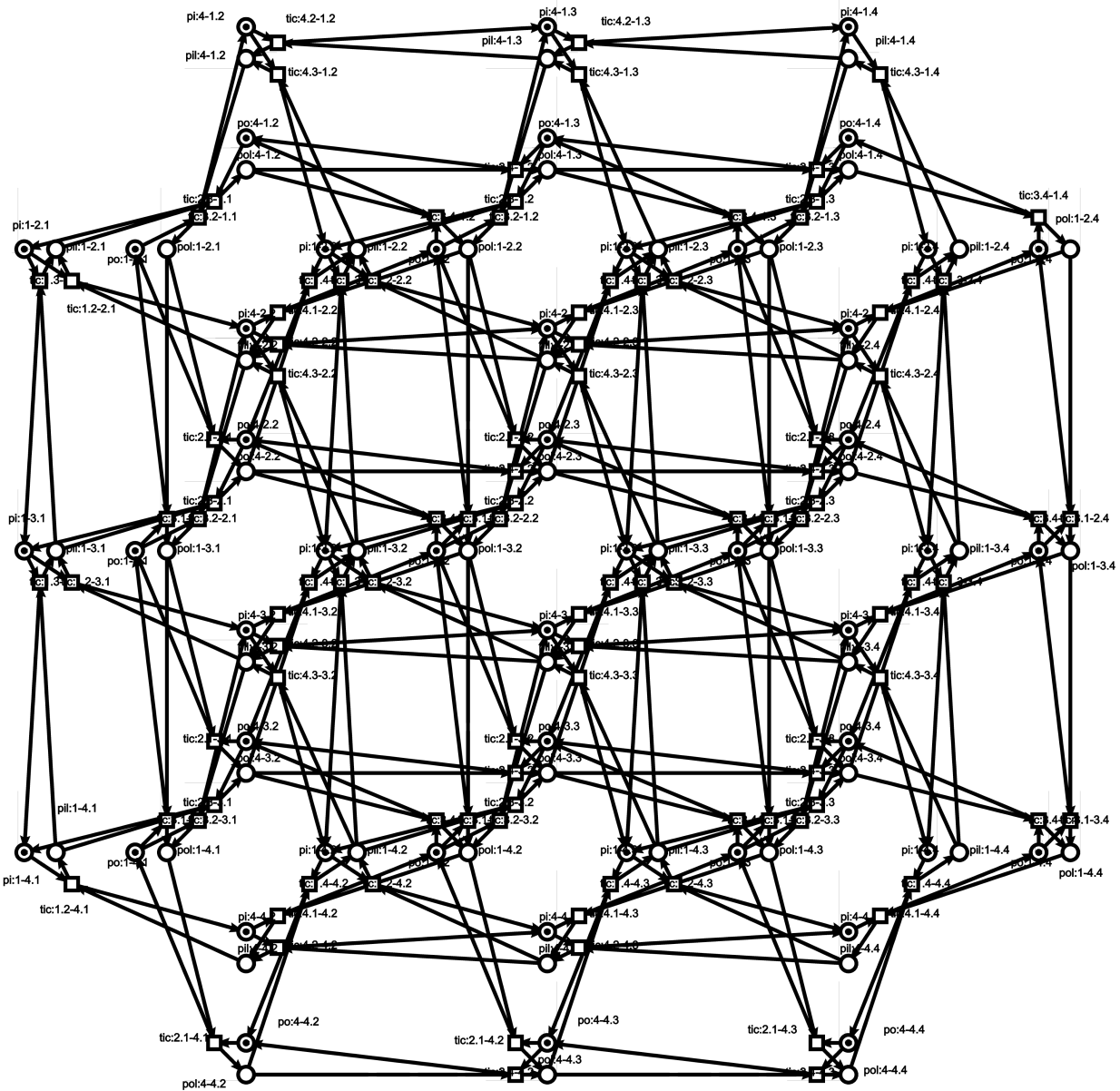


Рисунок 3 – Модель замкнутой прямоугольной решетки размером 4×4

Представленная на рис. 3, модель замкнутой прямоугольной решетки обладает свойством стационарной повторяемости [5], однако, в результате вычислительных экспериментов с моделью [6], выявлена тупиковая маркировка, показанная на рис. 3, что соответствует полной блокировке работы решетки, на промежутки времени старения пакета, предусмотренный стандартами. Например, для технологии Ethernet рекомендованный интервал составляет 300 с. Дальнейшие исследования показали, что в прямоугольных коммуникационных решетках произвольного размера с коммуникационным устройством, реализующим сквозную коммутацию пакетов, возникают не только взаимные блокировки устройств в парах, но и сложные тупики, изученные в [3, 4].

Построена модель коммуникационного устройства со сквозной коммутацией пакетов, являющаяся базовым элементом для композиций моделей прямоугольной коммуникационной решетки в форме бесконечных сетей Петри. Представлены прямое и двойственное параметрические описания бесконечных сетей Петри с регулярной структурой, которые применены для композиции бесконечных систем линейных уравнений, вычисления инвариантов позиций и переходов сети Петри и нахождения свойств моделей телекоммуникационных протоколов.

Направлением дальнейших исследований является аналитическое доказательство наличия тупиков в решетках любого размера, выявление оптимального количества пакетов для поддержания наилучшей производительности и качества обслуживания телекоммуникационных систем.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Zhemin Zhang; Zhiyang Guo; Yuanyuan Yang. Bounded-Reorder Packet Scheduling in Optical Cut-Through Switch. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems Year: 2015, Volume: 26, Issue: 11
2. Pages: 2927 - 2941, DOI: 10.1109/TPDS.2014.2363668
3. Cisco Nexus 3000 Series NX-OS Layer 2 Switching Configuration Guide, Release 5.0(3)U4(1), First Published: August 26, 2012, <http://www.cisco.com>
4. Shmeleva T.R. Analysis of square communication grids via infinite Petri nets / T.R. Shmeleva, D.A. Zaitsev, I.D. Zaitsev // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2009. – № 1. – С. 27-35.
5. Zaitsev D.A., Zaitsev I.D., Shmeleva T.R. Infinite Petri Nets as Models of Grids (pp. 187-204). Chapter 19 in Mehdi Khosrow-Pour (Ed.) Encyclopedia of Information Science and Technology, Third Edition (10 Volumes). IGI-Global: USA, 2014
6. Shmeleva T.R. Dual parametric description of grid models in infinite Petri nets form / T.R. Shmeleva // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2014. – № 1. – С. 94-101.
7. Моделирующая система Tina <http://www.laas.fr/tina>

REFERENCES:

1. Zhemin Zhang; Zhiyang Guo; Yuanyuan Yang. Bounded-Reorder Packet Scheduling in Optical Cut-Through Switch. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems Year: 2015, Volume: 26, Issue: 11
2. Pages: 2927 - 2941, DOI: 10.1109/TPDS.2014.2363668
3. Cisco Nexus 3000 Series NX-OS Layer 2 Switching Configuration Guide, Release 5.0(3)U4(1), First Published: August 26, 2012, <http://www.cisco.com>
4. Shmeleva T.R. Analysis of square communication grids via infinite Petri nets / T.R. Shmeleva, D.A. Zaitsev, I.D. Zaitsev // Proceedings of the O. S. Popov ONAT. – 2009. – № 1. – P. 27-35.
5. Zaitsev D.A., Zaitsev I.D., Shmeleva T.R. Infinite Petri Nets as Models of Grids (pp. 187-204). Chapter 19 in Mehdi Khosrow-Pour (Ed.) Encyclopedia of Information Science and Technology, Third Edition (10 Volumes). IGI-Global: USA, 2014.
6. Shmeleva T.R. Dual parametric description of grid models in infinite Petri nets form / T.R. Shmeleva // Proceedings of the O. S. Popov ONAT. – 2014. – № 1. – P. 94-101.
7. Modelling system Tina <http://www.laas.fr/tina>.