

**ПРОГРАММНЫЙ ГЕНЕРАТОР МОДЕЛЕЙ ПЕТРИ
ТРЕУГОЛЬНЫХ КОММУНИКАЦИОННЫХ РЕШЕТОК**

Шмелёва Т.Р.

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

**ПРОГРАМНИЙ ГЕНЕРАТОР МОДЕЛЕЙ ПЕТРИ
ТРИКУТНИХ КОМУНІКАЦІЙНИХ ҐРАТОК**

Шмельова Т.Р.

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

**PETRI MODELS PROGRAM GENERATOR OF
TRIANGULAR COMMUNICATION GRIDS**

Shmeleva T.R.

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

Аннотация. В настоящей работе представлен программный генератор моделей Петри треугольных коммуникационных решеток произвольного размера для верификации протоколов телекоммуникационных систем с треугольной ячейкой. Программный генератор моделей Петри написан на алгоритмическом языке Си, для генерации моделей решеток используется параметрическое описание сети Петри, которое базируется на основных характеристиках модели, таких как размер решетки, ёмкость буфера коммутатора, количество сообщений в каждом буфере коммутатора. Базовый элемент решетки содержит три порта, работающих в полнодуплексном режиме, порты назначения различаются в модели, введена обязательная буферизация и ограничение на размер внутреннего буфера коммутатора. Тип выходного формата формируемого файла для дальнейшего исследования решетки представлен в графическом формате моделирующей системы Tina. Методика может быть использована в широком диапазоне областей применения сетей Петри, включая автоматизацию производства, телекоммуникации и программирование.

Ключевые слова: бесконечная сеть Петри, вычисление на решетках, параметрическое описание, треугольная решетка, программный генератор.

Анотація. У даній роботі надано програмний генератор моделей Петрі трикутних комунікаційних ґраток довільного розміру для верифікації протоколів телекомунікаційних систем з трикутною коміркою. Програмний генератор моделей Петрі написаний алгоритмічною мовою С, для генерації моделей ґраток використовується параметричний опис сітки Петрі, який базується на основних характеристиках моделі, таких як розмір ґратки, ємність буфера комутатора, кількість повідомлень у кожному буфері комутатора. Базовий елемент ґратки містить три порти, що працюють в повнодуплексному режимі, порти призначення зрізняються в моделі, введена обов'язкова буферизація й обмеження на розмір внутрішнього буфера комутатора. Тип вихідного формату формованого файла для подальшого дослідження ґратки надано в графічному форматі моделюючої системи Tina. Методика може бути використана в широкому діапазоні областей застосування сіток Петрі, включаючи автоматизацію виробництва, телекомунікації та програмування.

Ключові слова: нескінченна сітка Петрі, обчислення на ґратках, параметричний опис, трикутна ґратка, програмний генератор.

Abstract. This paper presents a Petri models program generator of communication triangular grids of arbitrary size for verification of telecommunication systems protocols with a triangular cell. Petri models program generator written on the algorithmic language C, Petri nets parametric description is used for

generation of grid models, which is based on the basic characteristics of the model, such as the grid size, the buffer capacity of the switch, the number of messages in each buffer switch. The basic element of the grid contains three ports, which operating in full duplex mode, the destination ports are differed in model, introduced mandatory buffering and the size of the internal buffer has limit size. Type of output format of generated file for further investigation of the grid is presented in a Tina modeling system graphical format. The technique can be used in a wide range of applications of Petri nets, including manufacturing systems, telecommunications and programming.

Key words: Infinite Petri net, grid computing, parametric description, triangular grid, program generator.

Надежность и безопасность систем связи являются основополагающими характеристиками, позволяющими развивать дальнейшие исследования, связанные с эффективностью, оптимизацией производительности телекоммуникационных систем и качеством обслуживания. Применение сетей Петри [1, 2] позволяет выполнить формальную верификацию протоколов с помощью математического доказательства теорем о свойствах идеального протокола: живость, ограниченность и консервативность. Ввиду сложности и масштабности моделей современных сетей предложено использовать программные генераторы [3], которые используют для описания моделей систем прямое или двойственное параметрическое представление [4] сети Петри. Результатом применения предложенной методики является исследование реалистичных моделей большого размера за приемлемое время. Ранее были исследованы древовидные, квадратные коммуникационные решетки, куб и гиперкуб [1, 2]. В [5] предложен анализ треугольных решеток с простейшим базовым элементом, однако дальнейшее приближение моделей треугольных решеток к реальным системам [6, 7] не было реализовано. Актуальным остается вопрос развития [8], создания и применения моделирующих систем и программных модулей для анализа свойств моделей с учетом взаимодействия неограниченного количества устройств и их различных комбинаций.

Целью данной статьи является построение программного генератора моделей Петри треугольных коммуникационных решеток произвольного размера для верификации протоколов систем связи с треугольной ячейкой.

Применение треугольных решеток в телекоммуникациях. В основе построения телекоммуникационных систем и сетей используются решетки различных типов. Широкое практическое применение при проектировании и моделировании сетей Ethernet используются древовидные решетки [1], систем сотовой связи шестиугольные решетки. Треугольные решетки соответствуют форме зон покрытия в современных системах радио- и телевизионного вещания.

При планировании телевизионной сети определяются места расположения станций и выбор их параметров для обеспечения условий приема без взаимных помех. Наиболее экономичное планирование передающей телевизионной сети [6] достигается, если телевизионные передающие станции располагаются по углам равностороннего треугольника. На рис. 1 представлена схема размещения телевизионных радиопередатчиков.

Каждый базовый треугольник площадью ΔS обслуживается тремя радиопередатчиками. Далее можно рассчитать количество радиопередатчиков, необходимых для обеспечения вещания на территории с заданной площадью, число радиоканалов и другие технические параметры.

В сотовых сетях радиосвязи с подвижными объектами [7] важнейшим параметром является спектральная эффективность. Она показывает, какая величина телефонной нагрузки приходится на единицу площади обслуживаемой территории и на единицу выделенной полосы частот. Для повышения эффективности системы используют различные методы, в том числе секторизацию сот. В частности, при использовании шестисекторной системы уменьшается величина нагрузки, которую в состоянии обслужить аппаратные средства базовой станции без снижения качественных показателей. Исследована зависимость эффективности системы от радиуса соты при установке на базовых станциях направленных антенн, при шестисекторной организации работы сотовой сети подвижной радиосвязи.

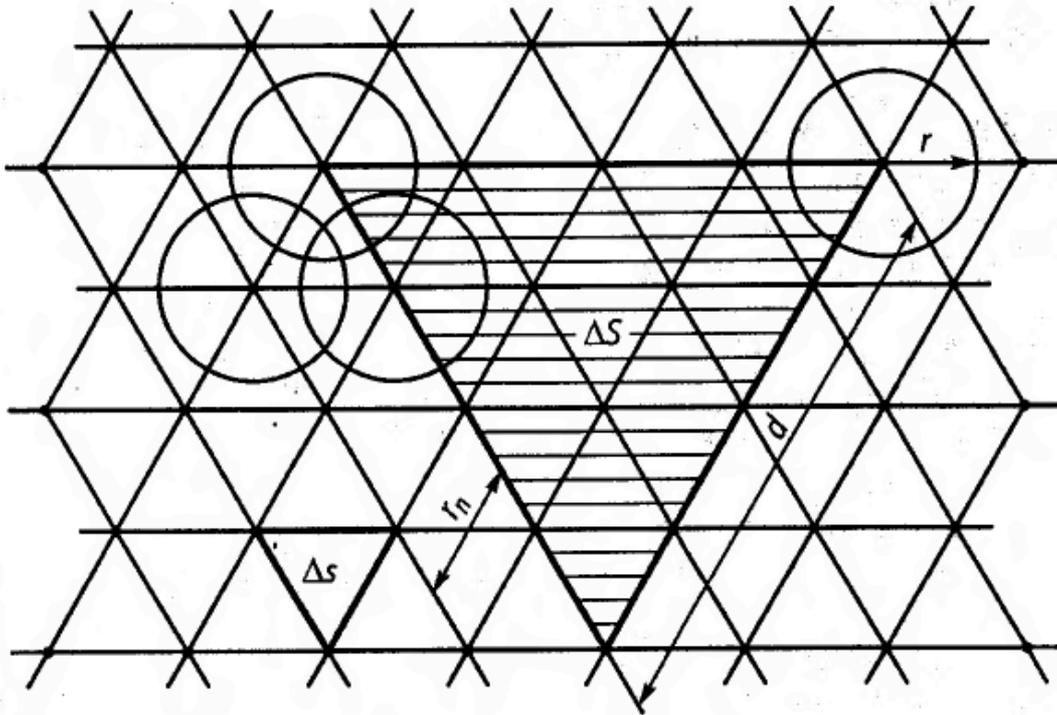


Рисунок 1 – Схема размещения телевизионных радиопередатчиков

Спецификация бесконечных треугольных решеток. Для построения бесконечной треугольной решетки необходимо ввести индексы базовых элементов, из которых состоит решетка. Для нумерации коммутаторов используется пара индексов (i, j) , где индекс i – номер уровня от корневого коммутатора, индекс j – последовательный номер коммутатора слева направо на i -м уровне. На рис. 2, а представлена схема соединения коммутаторов [5] в треугольной решетке.

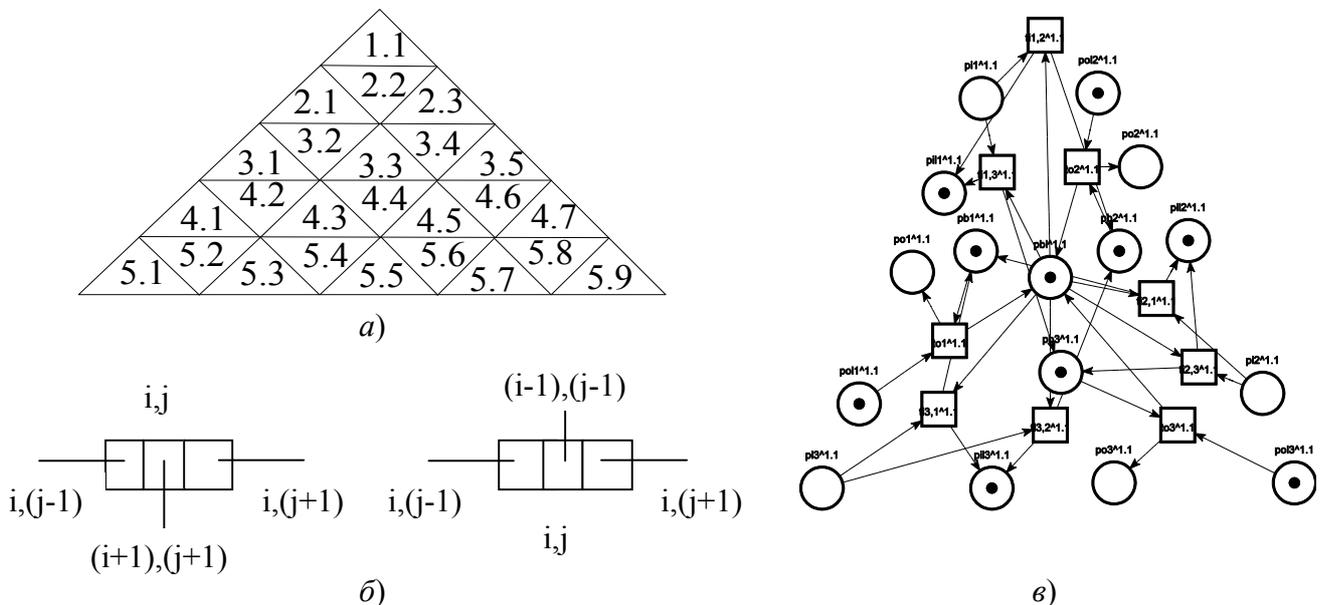


Рисунок 2 – Спецификация бесконечных треугольных решеток: а) схема соединения коммутаторов; б) базовые элементы; в) модель коммуникационного устройства с тремя портами

В представленной схеме второй порт коммутатора используется для соединения с коммутатором верхнего (нижнего) уровня, первый и третий порты для связи с соседними коммутаторами своего уровня. В отличие от [2] при построении решетки используются два базовых элемента, которые представлены на рис. 2, б.

Для построения модели треугольных коммуникационных структур в форме сетей Петри используется модель коммутатора [1, 2] с тремя портами рис. 2, в, работающего в полнодуплексном режиме, с обязательной буферизацией и ограничением на размер внутреннего буфера; в отличие от [5] порты назначения различаются в модели. В представленной модели сообщение моделируется одной фишкой, размер буфера измеряется в количестве сообщений. Модель решетки строится в графическом формате сетей Петри системы Tina [8].

В программном генераторе моделей Петри [3] для создания решетки предложено использовать прямое параметрическое описание модели [1, 2], в дальнейшем можно использовать второй вид представления – двойственное представление [4].

Определение основных параметров программного генератора треугольных решеток. Для построения треугольной коммуникационной решетки любого размера необходимо определить основные и вспомогательные параметры исследуемой решетки. Основные параметры являются входной (базовой) информацией для программного генератора, в предложенной реализации три основных параметра.

Первый параметр – это размер треугольной решетки, для обозначения будем использовать букву k , определяет количество уровней модели решетки. В зависимости от этого параметра рассчитывается количество элементов (треугольников) на каждом уровне и определяются вспомогательные параметры (i, j) для каждого треугольника, пример модели Петри 3-уровневой решетки представлен на рис. 3.

Второй параметр – количество сообщений в каждом буфере решетки, обозначим буквой p . Значение этого параметра равно нулю, если в модель добавлены элементы, имитирующие источники генерации сообщений.

Третий параметр – размер буфера решетки, обозначим буквой b , или доступный размер буфера решетки, если количество сообщений в каждом буфере p (второй параметр), не равен нулю. В модели, представленной на рис. 3, значение основных вводимых параметров равно: размер треугольной решетки $k = 3$, количество сообщений в каждом буфере решетки $p = 2$, размер буфера решетки $b = 4$.

Вспомогательные параметры (i, j) , во-первых, определяют правильную генерацию каждого элемента решетки, задавая уровень i , на котором находится элемент, и номер элемента j на i -м уровне. Во-вторых, используются для расчета смещения позиций и переходов внутри каждого треугольника. В-третьих, сложность построения треугольных коммуникационных решеток обусловлена наличием двух разных элементов, использующихся для генерации решетки. Поэтому, отдельно выделено построение нечетных и четных элементов, соответствующих прямым и перевернутым треугольникам.

Кроме основных и вспомогательных параметров, введен информативный параметр, не имеющий специального обозначения. Этот параметр указывает тип выходного формата формируемого файла для дальнейшего исследования решетки в моделирующей системе Tina [8], расширение генерируемого файла *.ndr.

Алгоритм работы программного генератора. Программный генератор моделей Петри треугольных коммутационных решеток написан на алгоритмическом языке Си, имя программы *3ga.c*. Генератор *3ga.exe* запускается из командной строки, указываются имя программы, три основных параметра и имя результирующего файла. Пример запуска генератора 3-уровневой треугольной решетки, представленной на рис. 3, с размером треугольной решетки $k = 3$, количеством сообщений в каждом буфере решетки $p = 2$, размером буфера решетки $b = 4$, показан на рис. 4.

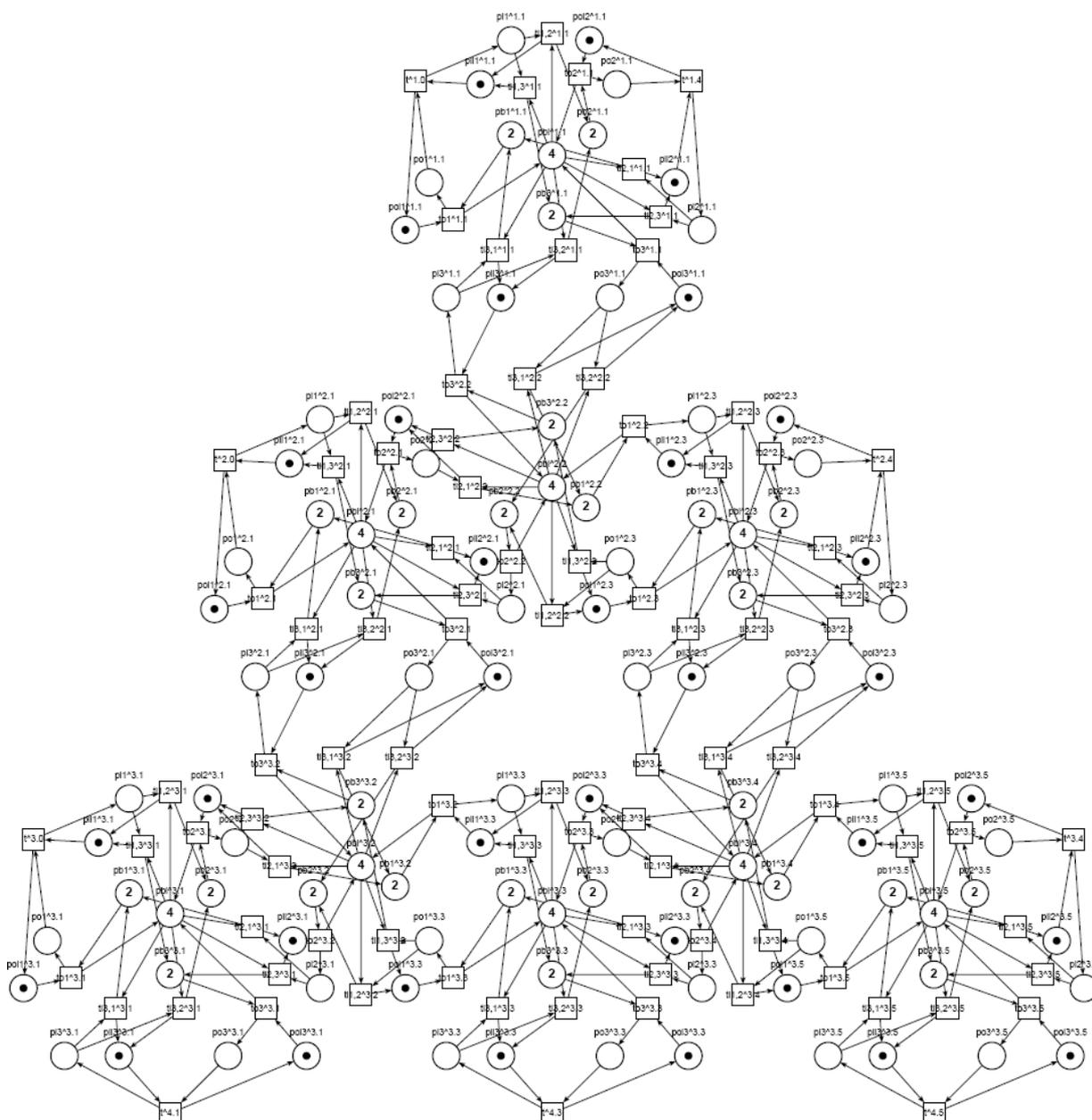


Рисунок 3 – Модель Петри 3-уровневой треугольной решетки, $k = 3, p = 2, b = 4$

`3ga 3 2 4 > t324.ndr`

Рисунок 4 – Запуск программного генератора

Первая часть листинга программного генератора, содержащая объявление переменных, констант и анализ введенных параметров, представлена на рис. 5. Если количество аргументов меньше двух, то программа завершает работу, иначе задаются: размер треугольной решетки k равен первому аргументу; количество сообщений в каждом буфере решетки p равно второму аргументу; размер буфера решетки $b = 0$, если введено только два аргумента, иначе равен третьему аргументу.

```

/* generator of triangular communication grids */
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#define DI 560.0
#define DJ 280.0
main( int argc, char * argv[] )
{
  int k,i,j,l,off,p=0,b=0;
  if( argc < 2 )
  {
    fprintf(stderr, "*** actually: %d arguments\n", argc);
    return 2;
  }
  k = atoi( argv[1] );
  if(argc>2) p = atoi( argv[2] );
  if(argc>3) b = atoi( argv[3] );

```

Рисунок 5 – Объявление переменных, констант, анализ параметров

Вторая часть листинга программного генератора, представленная на рис. 6, описывает основной цикл построения треугольной коммуникационной решетки заданного размера. Решетка строится последовательно с первого до k уровня, для каждого уровня задается внутренне смещение переменная off , используемое для построения элементов в i -м уровне.

```

for(i=1; i<=k; i++)
{
  off=DJ*(k-i);
  for(j=1; j<=2*i-1; j++)
  {
    if (j%2==1)
    {
      printf("p%.1f %.1f {pb1^%d.%d} %d n\n",off+j*DJ+280.0, i*DI+280.0,i,j,b);
      printf("p%.1f %.1f {pb1^%d.%d} %d n\n",off+j*DJ+220.0,i*DI+248.0,i,j,p);
      ...
      printf("t %.1f %.1f {to1^%d.%d} 0 w n\n",off+j*DJ+136.0,i*DI+376.0,i,j);
      printf("t %.1f %.1f {to2^%d.%d} 0 w n\n",off+j*DJ+320.0,i*DI+160.0,i,j);
      ...
      printf("e {pb1^%d.%d} {to1^%d.%d} 1 n\n", i, j, i, j);
      printf("e {to1^%d.%d} {po1^%d.%d} 1 n\n", i, j, i, j);
      ...
    }
    else
    {
      printf("p %.1f %.1f {pb1^%d.%d} %d n\n",off+j*DJ+280.0,i*DI+208.0,i,j,b);
      printf("p%.1f %.1f {pb1^%d.%d} %d n\n",off+j*DJ+332.0,i*DI+240.0, i,j,p);
      ...
      printf("t %.1f %.1f {to1^%d.%d} 0 w n\n",off+j*DJ+400.0,i*DI+120.0,i,j);
      printf("t %.1f %.1f {to2^%d.%d} 0 w n\n",off+j*DJ+220.0,i*DI+320.0,i,j);
      ...
      printf("e {pb1^%d.%d} {ti2,1^%d.%d} 1 n\n", i, j, i, j);
      printf("e {ti2,1^%d.%d} {pb1^%d.%d} 1 n\n", i, j, i, j);
      ...
    }
  }
}

```

Рисунок 6 – Построение треугольной коммуникационной решетки

Сначала идет построение элементов с нечетными индексами ($j\%2==1$), т.е. прямых треугольников. Формируются ограничители буферов коммутаторов с заданной емкостью b , буферы коммутаторов с заданным количеством сообщений p , далее позиции, моделирующие порты коммутаторов. Следующие блоки программы описывают построение всех переходов и дуг, соединяющих позиции и переходы.

Построение элементов с четными индексами, т.е. перевернутых треугольников, аналогично построению элементов с нечетными индексами. Отличие состоит в том, что для построения элементов с четными индексами используется другая шкала смещения внутри треугольника, обеспечивающая корректное объединение элементов модели. Результатом работы основного цикла является построение открытой треугольной коммуникационной решетки.

Дополнительные части листинга программного генератора, представленные на рис. 7 и 8, необходимы для создания элементов модели, которые формируются только после завершения построения решетки в основном цикле. На рис. 7 представлен фрагмент программы, добавляющий в модель дуги, соединяющие правый порт четного элемента с левым портом нечетного элемента. Необходимость дополнения связано с тем, что алгоритм работы генератора в основном цикле не формирует эти связи, так как сначала создается элемент с нечетным индексом, а затем с четным.

```

for(i=1; i<=k; i++)
{
    off=DI*(k-i);
    for(j=1; j<=2*i-1; j++)
    {
        if (j%2==0)
        {
            printf("e {t01^%d.%d} {p11^%d.%d} 1 n\n", i, j, i, j+1);
            printf("e {p111^%d.%d} {t01^%d.%d} 1 n\n", i, j+1, i, j);
            printf("e {p01^%d.%d} {t11,2^%d.%d} 1 n\n", i, j+1, i, j);
            printf("e {t11,2^%d.%d} {p011^%d.%d} 1 n\n", i, j, i, j+1);
            printf("e {p01^%d.%d} {t11,3^%d.%d} 1 n\n", i, j+1, i, j);
            printf("e {t11,3^%d.%d} {p011^%d.%d} 1 n\n", i, j, i, j+1);
        }
    }
}

```

Рисунок 7 – Соединение четных и нечетных элементов

```

for(i=1; i<=k; i++)
{
    off=DJ*(k-i);
    printf("t %.1f %.1f {t^%d.%d} 0 w n\n", off+1*DJ+80.0,
    (i)*DI+172.0, i, 0);
    printf("t %.1f %.1f {t^%d.%d} 0 w n\n", off+(2*i-1)*DJ+484.0,
    (i)*DI+172.0, i, k+1);
    printf("t %.1f %.1f {t^%d.%d} 0 w n\n", (2*i-1)*DJ+280.0,
    k*DI+576.0, k+1, (i-1)*2+1);

    printf("e {t^%d.%d} {p11^%d.%d} 1 n\n", i, 0, i, 1);
    printf("e {t^%d.%d} {p011^%d.%d} 1 n\n", i, 0, i, 1);
    printf("e {p01^%d.%d} {t^%d.%d} 1 n\n", i, 1, i, 0);
    printf("e {p111^%d.%d} {t^%d.%d} 1 n\n", i, 1, i, 0);
    ...
}

```

Рисунок 8 – Формирование терминальных элементов

Завершающий блок программы, представленный на рис. 8, формирует терминальные элементы. Элементы добавляются к открытой решетке последовательно с первого по k -й уровень, для каждого терминального элемента решетки с заданным смещением; индексы крайних левых и правых элементов $(i, 0)$ и $(i, k+1)$ соответственно, индексы элементов нижнего уровня $(k+1, (i-1)*2+1)$.

При создании всех элементов модели (позиций, переходов и дуг) учитывается как внешнее смещение, которое задается относительно левого верхнего угла модели и объявлено в первом блоке программы константы $DI\ 560.0$ и $DJ\ 280.0$, так и внутреннее смещение

каждого треугольника – переменная *off*. Для корректной прорисовки элементов внутри треугольника к перечисленным смещениям добавляются явно заданные значения или константы умножаются на индексы.

Анализ результатов работы программного генератора. Основной областью применения конкретных моделей решеток, полученных в результате работы генератора, является анализ свойств моделей коммутационных решеток в форме бесконечных сетей Петри с регулярной структурой. На основе расчета и анализа инвариантов позиций и переходов делается вывод о корректности протоколов коммуникационной решетки произвольного размера [1, 2]. Модель идеального телекоммуникационного протокола должна обладать свойствами консервативности и стационарной повторяемости, т.е. быть p - и t -инвариантной.

Автоматический анализ свойств сгенерированных моделей [3] с помощью инструментальной системы Tina [8] подтверждает гипотезу о том, что, несмотря на наличие свойств ограниченности и консервативности, сеть не обладает свойством живости. Таким образом, выявлена угроза безопасности сети в результате взаимной блокировки подмножеств ячеек. Математическое доказательство аналогичных теорем является направлением дальнейших исследований.

Методика построения программных генераторов моделей Петри может быть использована в широком диапазоне областей применения сетей Петри, включая автоматизацию производства, телекоммуникации и программирование.

ЛИТЕРАТУРА:

1. 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.
2. Shmeleva T.R. Analysis of square communication grids via infinite Petri nets / T.R. Shmeleva, D.A. Zaitsev, I.D. Zaitsev // Сборник трудов ОНАС. – 2009. – № 1. – С. 27-35.
3. Zaitsev D.A. Generators of Petri Net Models. / D.A. Zaitsev // Computer Communication & Collaboration. – 2014. – Vol. 2, Issue 2. – P. 12-25.
4. Shmeleva T.R. Dual parametric description of grid models in infinite Petri nets form / T.R. Shmeleva // Сборник трудов ОНАС. – 2014. – № 1. – С. 94-101.
5. Шмельёва Т.Р. Анализ треугольных коммутационных решеток бесконечными сетями Петри / Т.Р.Шмельёва, И. Кабаченко // Конференция ИИ. – Россия, Геленджик, 2009. – С. 178-180.
6. Локшин М.Г. Сети телевизионного и звукового ОВЧ ЧМ вещания / М.Г. Локшин, А.А. Шур, А.В. Кокорев, Р.А. Краснощеков. - М : Радио и связь, 1988. – 144 с.
7. Сукачѳв Э.А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами: учеб. пособ./ Сукачѳв Э.А. – [3-е изд., перераб. и дополн.]. – Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2013. – 256 с.
8. Моделирующая система Tina <http://www.laas.fr/tina>.

REFERENCES:

1. 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.
2. Shmeleva T.R. Analysis of square communication grids via infinite Petri nets / T.R. Shmeleva, D.A. Zaitsev, I.D. Zaitsev // Transactions of Odessa National Academy of Telecommunications. – 2009. – № 1. – P. 27-35.
3. Zaitsev D.A. Generators of Petri Net Models. / D.A. Zaitsev // Computer Communication & Collaboration. – 2014. – Vol. 2, Issue 2. – P. 12-25.
4. Shmeleva T.R. Dual parametric description of grid models in infinite Petri nets form / T.R. Shmeleva // Transactions of Odessa National Academy of Telecommunications. – 2014. – № 1. – P. 94-101.
5. Shmeleva T.R., Kabachenko I. Analysis of Triangular communication grids via infinite Petri nets // II'09 Conference. – Russia, Gelendgik, 2009. – P. 178-180. In Russ.
6. Lokshin M.G. Web TV and radio VHF FM broadcasting / M.G. Lokshin, A.A. Shur, A.V. Kokorev, R.A. Kraanoschekov. - M : Radio and communication, 1988. – 144 p. In Russ.
7. Sukachev E.A. Mobile radio networks with mobile objects: tutorial / Sukachev E.A. – [Third Edition, revised and supplemented]. – Odessa: A.S. Popov ONAT, 2013. – 256 p. In Russ.
8. Modelling system Tina <http://www.laas.fr/tina>.