

УДК 004.021

# ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ, ПРИ КОТОРОЙ ИЗ КАЖДОГО АТОМА, В КОТОРЫЙ ПОПАДАЕТ НЕЙТРОН, ВЫДЕЛЯЮТСЯ ПРИ РАСПАДЕ ВОСЕМЬ НЕЙТРОНОВ И ОБРАЗУЕТСЯ НОВЫЙ АТОМ

**ЧЕРНЫШЕВ КИРИЛЛ ДМИТРИЕВИЧ**

бакалавр

**ЯШОНКОВ АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ**

аспирант

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», город Тула

**Аннотация:** Сети Петри являются эффективным и наглядным инструментом для моделирования различных распределенных систем и процессов. Эта концепция была разработана немецким ученым Карлом Петри в 1939 году с целью описания химических процессов. Возможности моделирования, которые предоставляют сети Петри, а также их практическая полезность в различных приложениях объясняются тем, что они представляют собой сочетание графа и дискретной динамической системы. Благодаря этому сети Петри могут функционировать как статическая, так и динамическая модель объекта, который они описывают. Кроме того, отсутствие жесткой рамки аналитического порядка в определении входных и выходных отношений делает эту систему алгоритмически неопределенной, что схоже с характером имитационных моделей.

**Ключевые слова:** Сети Петри, модель ядерной реакции, дерево достижимости, видео плеер, Карл Петри, структура сетей Петри.

**STUDY OF PETRI NETS. CONSTRUCTION OF A MODEL OF A NUCLEAR REACTION IN WHICH EIGHT NEUTRONS ARE RELEASED DURING DECAY FROM EACH ATOM THAT IS IMPACTED BY A NEUTRON AND A NEW ATOM IS FORMED**

**Chernyshev Kirill Dmitrievich,  
Yashonkov Aleksey Vasilievich**

**Abstract:** Petri nets are an effective and visual tool for modeling various distributed systems and processes. This concept was developed by the German scientist Karl Petri in 1939 to describe chemical processes. The modeling capabilities provided by Petri nets, as well as their practical usefulness in various applications, are explained by the fact that they are a combination of a graph and a discrete dynamic system. Due to this, Petri nets can function as both a static and a dynamic model of the object they describe. In addition, the lack of a rigid framework of analytical order in determining input and output relations makes this system algorithmically

uncertain, which is similar to the nature of simulation models.

**Keywords:** Petri nets, nuclear reaction model, reachability tree, video player, Karl Petri, Petri net structure.

**Постановка и описание задачи.** В результате проведения научного исследования требуется используя сети Петри создать модель ядерной реакции. В данной модели каждый атом, в который входит нейтрон, распадается с выделением восьми нейтронов и формированием нового атома. После завершения работы над сетью следует построить дерево достижимости, которое позволит провести анализ свойств созданной модели.

Целями научно-исследовательской деятельности являются:

1. Анализ ключевых терминов, связанных с сетями Петри.
2. Исследование основных характеристик сетей Петри.
3. Изучение методов анализа сетей Петри.

**Ключевые идеи сетей Петри.** Сеть Петри можно формально описать как набор из четырех элементов, который представляет её структуру и функциональность.

$$S = \langle P, T, E, M_0 \rangle$$

где  $P$  – конечное множество позиций;

$T$  – конечное множество переходов (событий);

$E$  – конечное множество дуг,  $E \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ ;

$M_0$  – начальная маркировка,  $M_0: P \rightarrow N, N = \{0, 1, 2, \dots\}$ .

Количество всех возможных маркировок в сети Петри является бесконечным. Когда в определенной позиции накапливается чрезмерное количество фишек, более практично не изображать сами фишки внутри круга этой позиции, а просто указывать их численное значение.

В графической интерпретации сеть Петри представлена как двусторонний ориентированный граф, который состоит из узлов двух типов — мест и переходов. Места обозначаются кругами, а переходы — прямоугольниками. Каждая дуга может соединять вершину-позицию с вершиной-переходом, или наоборот. При этом соединение двух позиций или двух переходов между собой не допускается. Места, у которых нет входящих дуг, называются входными местами, тогда как те, что не имеют исходящих дуг, считаются выходными местами.

Каждая позиция в сети Петри может содержать различные количество маркеров (tokens), начиная от нуля. Все маркеры воспринимаются как одинаковые и не имеют различий. То, как маркеры распределены по позициям сети, называется разметкой. Начальная разметка представляет собой отправную точку функционирования системы. Маркеры могут перемещаться между позициями, и этот процесс осуществляется по заранее установленным правилам:

- Переход признается активным в том случае, если на каждой из его входных дуг имеется по одной метке.
- Когда активный переход активируется, он удаляет одну метку с каждого входа и добавляет одну метку на каждый выход (по одной метке на каждую исходящую дугу).
- В любой момент времени из всех активных переходов выбирается один случайным образом для выполнения.
- Если активных переходов не осталось, сеть прекращает свою работу.
- Все достижимые маркировки сети Петри, а также все возможные последовательности запусков ее переходов представляются с помощью дерева достижимости.

**Метод создания конечного дерева достижимости.** Каждая вершина данного дерева классифицируется на несколько типов в соответствии с предложенным методом: это может быть крайняя вершина, конечная вершина, дублирующая вершина или внутренняя вершина. Алгоритм начинается с установки начальной метки на корневой узел и определения крайних вершин. Один из этапов алгоритма включает в себя работу с крайней вершиной. Обозначим крайнюю вершину как  $x$ ; процесс ее обработки осуществляется следующим образом:

1. Если в дереве имеется другая вершина  $y$ , не являющаяся граничной, и с ней связана та же

маркировка,  $\mu[x]=\mu[y]$ , то вершина  $x$  становится дублирующей.

2. Если для маркировки  $\mu[x]$  ни один из переходов не разрешен, то  $x$  становится терминальной.

3. В противном случае, для всякого перехода  $t \in T$ , разрешенного в  $\mu[x]$ , создаётся новая вершина  $z$  дерева достижимости. Маркировка  $\mu[z]$ , связанная с этой вершиной, определяется для каждой позиции  $p \in P$  следующим образом:

3.1. Если  $\mu[x](p)=\omega$ , то  $\mu[z](p)=\omega$ .

3.2. Если на пути от корневой вершины  $x$  существует вершина  $y$  с  $\mu[y] < \mu'$  (где  $\mu'$  – маркировка, непосредственно достижимая из  $\mu[x]$  посредством запуска перехода  $t$ ) и  $\mu[y](p) < \mu'(p)$ , то  $\mu[z](p)=\omega$ . (В этом случае последовательность запусков переходов, ведущая из маркировки  $\mu[y]$  в маркировку  $\mu'$ , может неограниченно повторяться и неограниченно увеличивать значение маркировки в позиции  $p$ .) В противном случае  $\mu[z](p)=\mu'(p)$ .

4. Строится дуга с пометкой  $t$ , направленная от вершины  $x$  к вершине  $z$ . Вершина  $x$  становится внутренней, а вершина  $z$  – граничной.

Такая обработка алгоритмом граничных вершин продолжается до тех пор, пока все вершины дерева не станут терминальными, дублирующими или внутренними. Затем алгоритм останавливается.

Дерево достижимости можно использовать для решения задач безопасности, ограниченности, сохранения и покрываемости. К сожалению, в общем случае его нельзя использовать для решения задач достижимости и активности, эквивалентности. Решение этих задач ограничено существованием символа  $\omega$ . Символ  $\omega$  означает потерю информации: конкретные количества фишек отбрасываются, учитывается только существование их большого числа.

**Описание инструмента моделирования.** Петри-сети были разработаны и в основном используются для симуляции разнообразных систем. Они обеспечивают эффективное моделирование множества систем, особенно тех, которые состоят из автономных элементов, таких как программное и аппаратное обеспечение компьютеров, физические структуры, социальные системы и другие.

Для создания визуализации сетевой структуры использовалась программа Visio 2016 — инструмент для построения различных диаграмм и схем. Ключевым преимуществом этого программного обеспечения является применение векторной графики, позволяющее увеличивать или уменьшать изображения без потери их четкости. Программа также поддерживает современные стандарты бизнес-моделирования, такие как BPMN и UML, что предоставляет пользователю широкий спектр возможностей.

**Моделирование сети Петри. Построение модели объекта.** На рисунке 1 представлен алгоритм функционирования процесса ядерной реакции, описанного в задании.

Выделим множество позиций и переходов, необходимых для проектирования сети.

Множество позиций  $P = \{p1, p2, p3\}$ , где

$p1$  – наличие свободного атома;

$p1$  – наличие свободного нейтрона;

$p1$  – нейтрон столкнулся с атомом.

Множество переходов  $P = \{p1, p2, p3\}$ , где

$t1$  – атом и нейтрон движутся по пересекающимся траекториям;

$t2$  – реакция с образованием новых элементов.

Представление системы сетью Петри основано на двух основополагающих понятиях: событиях и условиях. Возникновением событий управляет состояние системы, которое может быть описано множеством условий. Условие может принимать либо значение «истина», либо значение «ложь». Возникновение события (срабатывание перехода) в системе возможно, если выполняются определённые условия – предусловия события (наличие хотя бы одной метки во входящих позициях). Возникновение события может привести к выполнению других условий – постусловий события (добавление меток по выходящим из перехода дугам).

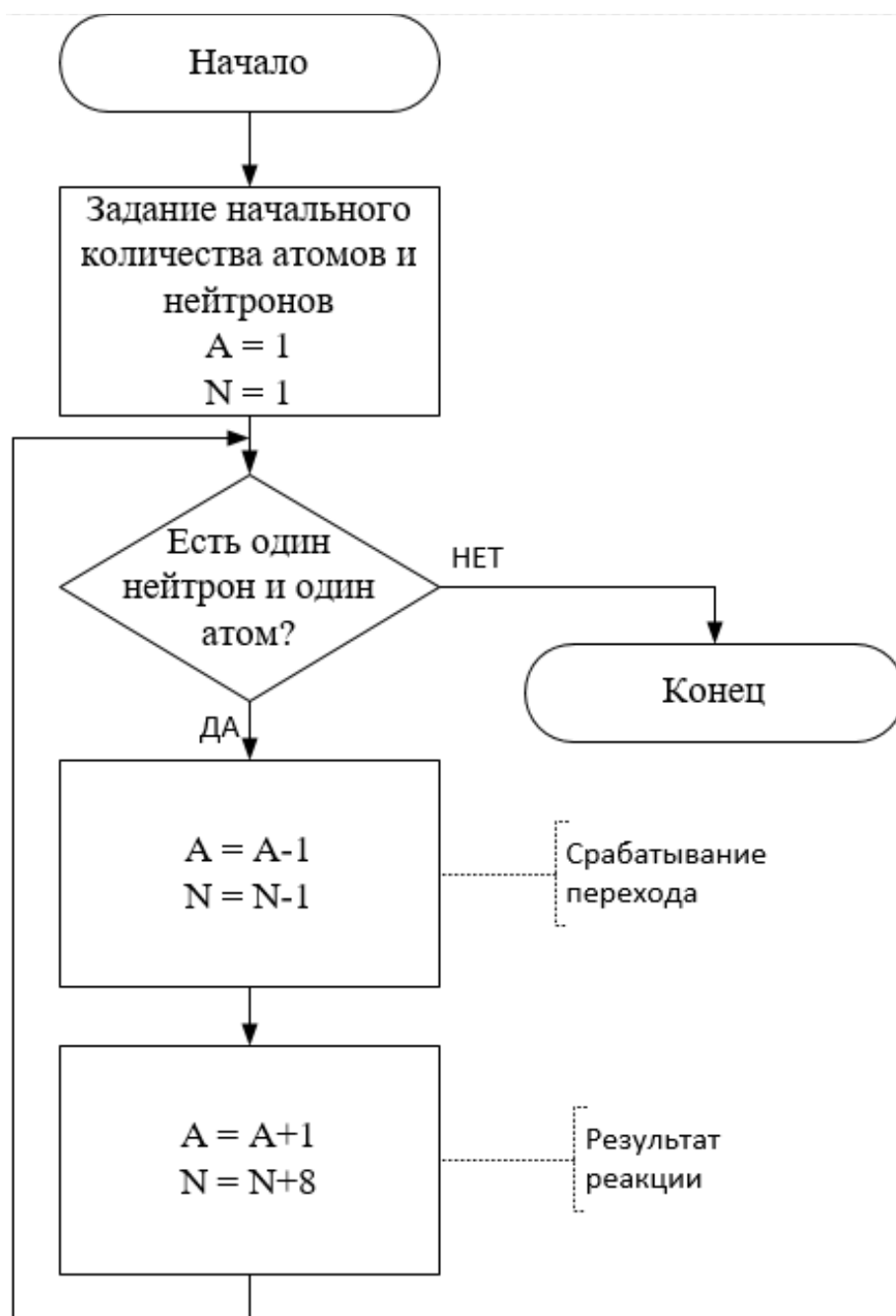


Рис. 1. Схема функционирования процесса

В таблице 1 представлены предусловия и постусловия для всех событий.

Таблица 1

Пред- и постусловия		
Событие	Предусловие	Постусловия
t1	p1, p2	p3
t2	p3	p1, p2, p2, p2, p2, p2, p2, p2, p2

Количество меток в позиции будет обозначать количество свободных нейтронов (атомов).

Предполагаем, что изначально имеется один атом и один нейтрон. Тогда начальное состояние рассматриваемой сети показано на рисунке 2.

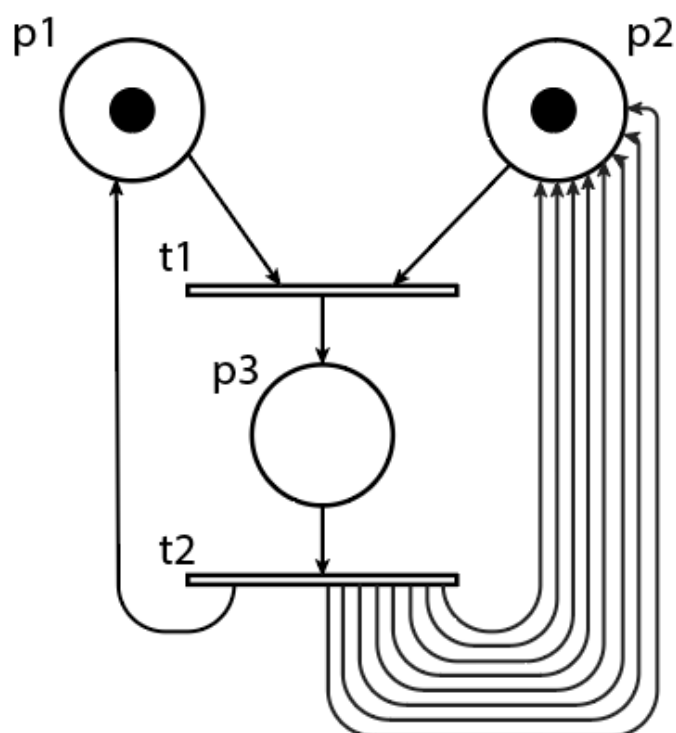


Рис. 2. Начальное состояние сети

При срабатывании перехода  $t1$  из позиций  $p1$  и  $p2$  убирается по одной метке, а сам переход становится активным. На рисунке 3 представлено первое столкновение (процесс реакции).

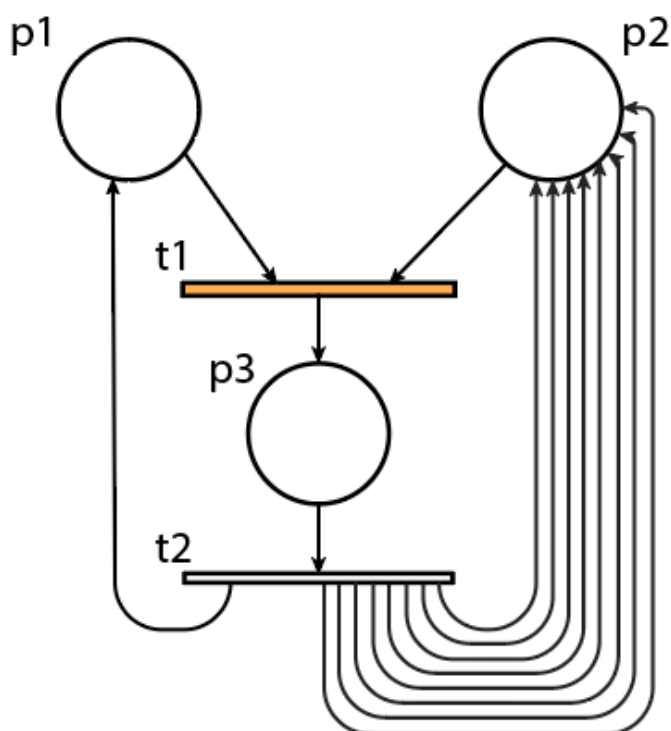


Рис. 3. Активный переход

После заданной задержки (2 с) переход становится неактивным, и каждая выходная дуга добавляет в позицию по одной метке. На рисунке 4 представлено состояние сети после выполнения перехода.

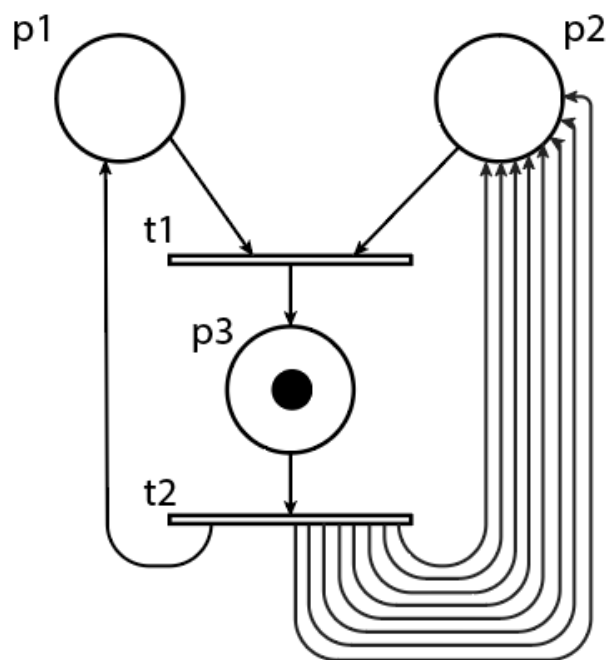


Рис. 4. Последствия срабатывания перехода  $t_1$  один раз

Поле срабатывания перехода  $t_2$  маркировка сети станет  $(1; 8; 0)$ . Построенная сеть никогда не завершит работу, так как в ходе реакции образуются обе составляющие для новой реакции.

**Построение графа достижимых маркировок.** На рисунке 5 представлено дерево достижимости.

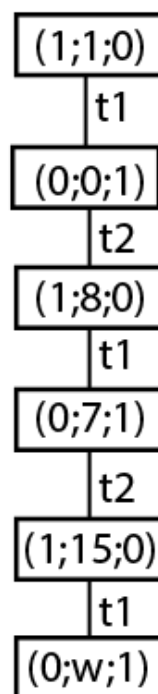


Рис. 5. Дерево достижимости

Проведем анализ полученной сети. По динамическим ограничениям построенная сеть небезопасная (в  $p_2$  может находиться более одного маркера) и неограниченная (нет целого числа  $k$ , для которого она  $k$ -ограничена).

По статическим ограничениям сеть не является ни сетью свободного выбора, ни маркированным графом, ни автоматной, ни бесконфликтной, ни простой сетью.

**Вывод.** В ходе работы над научно-исследовательской работой были изучены основные понятия сетей Петри, рассмотрены ее основные свойства. Была построена модель объекта и соответствующий граф достижимых маркировок. Проведен анализ полученной сети.

#### Список источников

1. Сеть Петри [Электронный ресурс]. wikipedia – Режим доступа: [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.6b91bc9f-66bdab8f-ce09509d-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Petri\\_net](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.6b91bc9f-66bdab8f-ce09509d-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Petri_net) (дата обращения 29.07.2024).
2. Сети Петри. Структура и правила выполнения сетей Петри. [Электронный ресурс]. Itmodeling – Режим доступа: [https://itmodeling.fandom.com/ru/wiki/Сети\\_Петри.\\_Структура\\_и\\_правила\\_выполнения\\_сетей\\_Петри](https://itmodeling.fandom.com/ru/wiki/Сети_Петри._Структура_и_правила_выполнения_сетей_Петри). (дата обращения 23.07.2024).
3. Сети Петри. [Электронный ресурс]. bigor.bmstu – Режим доступа: [http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?prn=y/?doc=110\\_Simul/3018.mod](http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?prn=y/?doc=110_Simul/3018.mod). (дата обращения 15.07.2024).
4. Сети Петри. [Электронный ресурс]. opennet – Режим доступа: [https://opennet.ru/docs/RUS/inet\\_book/10/petri.html](https://opennet.ru/docs/RUS/inet_book/10/petri.html). (дата обращения 12.07.2024).
5. Ядерные модели. [Электронный ресурс]. wikipedia – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ядерные\\_модели](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ядерные_модели). (дата обращения 18.07.2024).
6. Модели атомных ядер. [Электронный ресурс]. nuclphys.sinp – Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/introduction/xx3.htm>. (дата обращения 21.07.2024).