

УДК 004.032.26

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

**К.Д. Чернышев,**  
бакалавр

**А.В. Яшонков,**  
аспирант,

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»,  
г. Тула

**Аннотация:** Сети Петри представляют собой мощный инструмент для моделирования и анализа динамических систем, что делает их особенно актуальными в условиях современного мира, где параллельные вычисления и сложные системы становятся все более распространенными. С момента своего появления в 1962 году, когда их предложил немецкий ученый Карл А. Петри, эти модели нашли широкое применение в различных областях, включая информатику, автоматизацию, управление производственными процессами и даже биоинформатику. Сети Петри позволяют не только визуализировать процессы, но и анализировать их поведение, что делает их незаменимыми в разработке и оптимизации сложных систем. Актуальность данной работы обусловлена растущей потребностью в эффективных методах моделирования и анализа параллельных процессов, которые становятся все более важными в условиях стремительного развития технологий. В частности, с увеличением числа многоядерных и многопроцессорных систем, а также с развитием облачных вычислений, возникает необходимость в инструментах, способных эффективно управлять параллелизмом и синхронизацией процессов. Сети Петри, благодаря своей способности моделировать взаимодействие между параллельными процессами, представляют собой идеальный выбор для решения этих задач.

**Ключевые слова:** Петри, сеть Петри, дискретные системы, Карл Петри, математический объект

**Введение.** Сети Петри представляют собой важный инструмент для моделирования и анализа динамических систем. Разработанные Карлом Петри в 1962 году, они сочетают в себе элементы графов и теории множеств, что позволяет эффективно описывать процессы, включающие параллелизм, конкуренцию и синхронизацию [1]. Структурно сети Петри состоят из двух типов элементов: мест (позиции) и переходов. Места, представленные кругами, могут содержать токены, отражающие состояние системы, в то время как переходы, изображаемые прямоугольниками, определяют правила активации, которые устанавливают, когда токены могут перемещаться между местами [3].

Один из ключевых аспектов сетей Петри заключается в возможности визуализировать и анализировать сложные динамические системы, такие как производственные процессы, информационные системы и даже сети компьютерных инфраструктур [2]. Каждая сеть Петри может быть обозначена как пара  $(P, T)$ , где  $P$  – множество мест, а  $T$  – множество переходов. Связи между местами и переходами задаются дугами, определяющими поток токенов, что позволяет моделировать различные жизненные циклы объектов в системах [4].

Модели на основе сетей Петри обладают уникальными свойствами, позволяющими исследовать такие важные аспекты, как достижимость, живучесть и порядок выполнения переходов, что делает их особенно ценными для диагностики и проектирования систем [5]. Одной из центральных задач в теории сетей Петри является задача достижимости, которая позволяет определить, возможно ли достичь заданного состояния системы, начиная с определенного начального состояния. Несмотря на свою полезность, сети Петри имеют свои ограничения. Например, их возможности моделирования могут снижаться при учете акций, зависящих от временных параметров или частоты событий [2]. Тем не менее, использование сетей Петри в современных приложениях продолжает расширяться. В частности, в области параллельных вычислений их применяют для описания работы многопоточных программ, где важно учитывать одновременное выполнение процессов и взаимодействие между ними.

**Структура сетей Петри.** Сети Петри представляют собой мощный инструмент для моделирования и анализа динамических дискретных систем. Их структура позволяет описывать сложные процессы, в которых происходят взаимодействия между объектами, обеспечивая при этом однозначное представление состояний системы. Каждый элемент сети выполняет свою уникальную функцию, что делает их особенно полезными в контексте параллельных вычислений и управления системами. Основными элементами сети Петри являются позиции, переходы и дуги. Позиции обозначают различные состояния системы и могут содержать маркеры, которые отражают текущее состояние сети. Переходы являются событиями, которые могут произойти, когда в соответствующих входных позициях достаточно маркеров. Дуги связывают эти элементы, определяя направление потока маркеров и указывая, какие позиции являются входными и выходными для конкретного перехода [1]. Интересно, что сети Петри могут также включать ингибиторные дуги – дополнительно создаваемые связи, которые управляют активностью переходов. Эти дуги предотвращают срабатывание переходов в зависимости от состояния входных позиций. Таким образом, использование ингибиторных дуг расширяет возможности сетей Петри для моделирования более сложных, контролируемых процессов, что значительно увеличивает их применение в таких областях как робототехника и автоматизация [1].

Несмотря на свои преимущества, создание и исследование сетей Петри требует тщательного анализа, особенно при увеличении числа элементов сети. Сложные сети могут столкнуться с проблемами недетерминированного поведения и состояния, что требует дополнительных методов анализа, таких как симуляция или математическая верификация. Это позволяет гарантировать, что модель адекватно передаёт желаемые характеристики реальной системы [6].

Ключевым аспектом, который следует учитывать при работе с сетями Петри, является идентификация всех возможных состояний и последовательностей событий, которые могут произойти в системе. Это знание дает возможность оптимизировать рабочие процессы и эффективнее использовать ресурсы, а также минимизировать время реакции на изменения в системе. Изучение всех конфигураций сети и

их последствий составляет важную часть работы с этими моделями и требует глубоких теоретических знаний и практического опыта в данной области.

Таким образом, сети Петри предоставляют широкие возможности для создания и анализа различных моделей дискретных систем. Их структура и функциональность делают их незаменимыми в современных исследованиях и практическом применении в различных сферах, от системы управления до параллельных вычислений.

**Функциональные возможности сетей Петри.** Сети Петри представляют собой мощный инструмент для моделирования и анализа динамических дискретных систем. Они позволяют графически представлять состояние системы через множество узлов, представленных позициями и переходами, что помогает зрительно упростить восприятие процессов, протекающих в системе. Это визуальное представление дает возможность лучше понимать архитектуру и взаимодействия в рамках сложных систем [7].

Функциональные возможности сетей Петри не ограничиваются лишь процессами, работающими параллельно. Они также охватывают обработку событий в системах, где происходит динамическое изменение состояния. Моделирование через события позволяет анализировать, как система реагирует на различные внешние воздействия и как изменяются ее состояния в результате этих воздействий. Это открывает новые горизонты для исследования систем в различных областях, включая экономику, информационные технологии и биологию [8].

При помощи сетей Петри также возможно моделирование пространственно-распределенных систем. Благодаря своей структуре, сети могут быть построены так, чтобы учитывать разные уровни взаимодействия и функциональные блоки на различных этапах обработки данных. Эта многоуровневая структура предоставляет исследователям инструменты для глубокого анализа систем, что позволяет выявлять скрытые закономерности и оптимизировать процессы на всех уровнях [9].

**Применение сетей Петри в параллельных вычислениях.** Сети Петри находят широкое применение в области параллельных вычислений, благодаря своей способности точно моделировать сложные процессы, связанные с параллельностью и синхронизацией.

Одним из важных направлений использования является моделирование алгоритмов, что позволяет оценить производительность и выявить узкие места. Например, исследование применения сетей Петри для анализа шифрования по ГОСТ 28147-89 продемонстрировало возможность улучшения производительности процессов на 4% за счет оптимизации работы процессора и арифметического сопроцессора [11]. Комплексные задачи с параллельными процессами также могут быть смоделированы с помощью сетей Петри. Использование конструкций `fork/join` позволяет представлять параллельные ветви выполнения, что критически важно для реализации алгоритмических структур, в которых происходит создание и слияние потоков обработки данных. Конструкция `fork` создает новый поток, в то время как `join` обеспечивает синхронизацию ветвей после завершения их работы, позволяют избежать ошибок, связанных с некорректным завершением параллельных процессов [10]. Верификация программ, особенно в контексте параллельных вычислений, является ключевым аспектом обеспечения надежности и корректности работы программного обеспечения. Сети Петри используются для формальной верификации, что позволяет автоматизировать анализ и значительно улучшить процесс разработки [12]. Применение сетей Петри как инструмента для этой задачи снижает вероятность наличия ошибок, которые могут возникать ввиду неправильной работы параллельных потоков и синхронизации. Анализ распределенных систем – еще один важный аспект применения сетей Петри. Моделирование поведения таких систем позволяет исследовать различные недостатки, которые могут возникать в процессе работы, такие как взаимное блокирование или неэффективное распределение ресурсов. В результате, разработка сбалансированных подходов к распределению вычислительных ресурсов и управлению потоками данных становится возможной с использованием сетей Петри как базовой модели для анализа [13].

**Анализ эффективности моделей на основе сетей Петри.** Анализ эффективности моделей, основанных на сетях Петри, направлен на выявление особенностей и преимуществ применения этих инструментов в различных сферах, включая информационные технологии и управление производственными процессами. Стохастические сети Петри (ССП) обеспечивают возможность

детального анализа поведения сложных систем, представляя математическую основу для моделирования динамических процессов, которые происходят в реальном времени. Ключевым элементом в анализе ССП является построение операционных моделей, позволяющих не только визуализировать, но и математически описывать систему. Эти модели учитывают интенсивности срабатывания переходов, которые могут значительно изменить характеристики работы системы в зависимости от различных нагрузок и внешних условий [14]. Значение и роль временных задержек также неуклонно возрастает; отсутствие учета этих факторов может привести к неверным выводам о производительности системы [15].

Помимо традиционных подходов, исследуются модификации сетей Петри для специфических задач, таких как защита информации или управление проектами. Выделение структурных особенностей помогает создать более адаптивные и устойчивые решения, основанные на спецификациях реальных процессов. Важно отметить, что современные системы всё чаще требуют интеграции разных подходов и технологий, что также можно реализовать на базе сетей Петри [16].

В конечном итоге, анализ эффективности моделей, основанных на сетях Петри, представляет собой многогранный процесс, требующий междисциплинарного подхода. Успешное применение данных моделей возможно лишь при синергии теории и практики, а также внедрении актуальных данных в процессы моделирования и анализа. Все это создает надежную базу для дальнейших исследований и приложения сетей Петри в различных областях.

**Будущее исследований в области сетей Петри.** Современные исследования в области сетей Петри претерпевают значительные изменения, обусловленные технологическим прогрессом и растущими требованиями к моделированию сложных систем. Для более эффективного использования данного инструмента исследователи активно разрабатывают новые типы сетей, такие как сервис-ориентированная модель сети Петри (SOPN), что позволяет расширить возможности анализа и внедрить новые функции, такие как управление ресурсами и удовлетворение требований безопасности [18]. Важным аспектом современных исследований является

интеграция сетей Петри с другими математическими и компьютерными методами. Помимо расширения функциональных возможностей сетей Петри, не менее важным является развитие методов верификации, которые позволяют проверять корректность функционирования многомодульных и многоагентных систем. Эти методы исследуются и внедряются для создания надежных и безопасных программных решений, что становится особенно важным в условиях сложных сетевых взаимодействий и рисков, связанных с ними [17]. Исследования в этой области дают возможность более глубоко анализировать потенциальные сценарии повреждений или сбоев в системах на основе сетей Петри.

**Заключение.** В заключение данной работы можно подвести итоги, касающиеся создания и исследования сетей Петри, а также их значимости в контексте современных вычислительных систем и параллельных вычислений. Сети Петри, как мощный инструмент для моделирования динамических систем, предоставляют исследователям и практикам уникальные возможности для анализа и оптимизации процессов, которые имеют место в различных областях, включая информатику, автоматизацию, управление производственными процессами и многие другие.

В ходе работы мы рассмотрели основные теоретические аспекты, касающиеся сетей Петри, включая их структуру, элементы и функциональные возможности. Мы проанализировали, как места, переходы и дуги взаимодействуют друг с другом, создавая сложные модели, которые могут эффективно описывать параллельные процессы. Это взаимодействие является ключевым для понимания динамики систем, что, в свою очередь, позволяет более точно моделировать и предсказывать поведение сложных систем.

Таким образом, работа над сетями Петри не только углубляет наше понимание динамических систем, но и предоставляет практические инструменты для их анализа и оптимизации. Мы уверены, что дальнейшие исследования в этой области будут способствовать развитию новых технологий и методов, которые сделают системы более эффективными, надежными и адаптивными к изменениям в окружающей среде. Сети Петри, как один из ключевых инструментов в арсенале исследователей и практиков, будут

продолжать играть важную роль в будущем, открывая новые возможности для моделирования и анализа сложных систем.

### Список литературы

[1] Сеть Петри – Википедия // ru.wikipedia.org [Электронный ресурс] – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/сеть\\_петри](https://ru.wikipedia.org/wiki/сеть_петри). (дата обращения: 31.10.2024).

[2] Сети Петри. Структура и правила выполнения сетей Петри // itmodeling.fandom.com [Электронный ресурс] – URL: [https://itmodeling.fandom.com/ru/wiki/сети\\_петри\\_структура\\_и\\_правил\\_а\\_выполнения\\_сетей\\_петри](https://itmodeling.fandom.com/ru/wiki/сети_петри_структура_и_правил_а_выполнения_сетей_петри). (дата обращения: 31.10.2024).

[3] Сеть Петри – Petri net – Википедия // tr-page.yandex.ru [Электронный ресурс] – URL: [https://tr-page.yandex.ru/translate?lang=en-ru&url=https://en.wikipedia.org/wiki/petri\\_net](https://tr-page.yandex.ru/translate?lang=en-ru&url=https://en.wikipedia.org/wiki/petri_net). (дата обращения: 31.10.2024).

[4] Сети Петри // spravochnick.ru [Электронный ресурс] – URL: [https://spravochnick.ru/informatika/seti\\_petri/](https://spravochnick.ru/informatika/seti_petri/). (дата обращения: 31.10.2024).

[5] Microsoft Word – Сети Петри\_МЛ\_водзнаки // matematem.ru [Электронный ресурс] – URL: [https://matematikem.ru/wp-content/uploads/2012/12/сети-петри\\_мл\\_водзнаки.pdf](https://matematikem.ru/wp-content/uploads/2012/12/сети-петри_мл_водзнаки.pdf). (дата обращения: 31.10.2024).

[6] Сети Петри с переключателями // studfile.net [Электронный ресурс] – URL: <https://studfile.net/preview/1529418/page:6/>. (дата обращения: 31.10.2024).

[7] Мальков М.В., Малыгина С.Н. Сети Петри и моделирование // Труды Кольского научного центра РАН. – 2010. №3. [Электронный ресурс] – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/seti-petri-i-modelirovanie>. (дата обращения: 31.10.2024).

[8] УДК 001 // rtj.mirea.ru [Электронный ресурс] – URL: <https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/941/02-kudj.pdf>. (дата обращения: 31.10.2024).

[9] 3.2.2. Сети Петри // studfile.net [Электронный ресурс] – URL: <https://studfile.net/preview/5266138/page:25/>. (дата обращения: 31.10.2024).



[10] Применение сетей Петри в задачах моделирования. Дипломная. // [www.bibliofond.ru](http://www.bibliofond.ru) [Электронный ресурс] – URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=537573>. (дата обращения: 31.10.2024).

[11] Сизоненко А.Б., Меньших В.В. Использование сетей Петри для моделирования способов распараллеливания алгоритмов защиты информации в системах с массивно-параллельными сопроцессорами // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2014. №3. [Электронный ресурс] – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-setey-petri-dlya-modelirovaniya-sposobov-rasparallelivaniya-algoritmov-zaschity-informatsii-v-sistemah-s-massivno> (дата обращения: 31.10.2024).

[12] (PDF) petri-net based method of parallel programs formal verification // [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net) [Электронный ресурс] – URL: [https://www.researchgate.net/publication/338797473\\_petri-net\\_based\\_method\\_of\\_parallel\\_programs\\_formal\\_verification](https://www.researchgate.net/publication/338797473_petri-net_based_method_of_parallel_programs_formal_verification). (дата обращения: 31.10.2024).

[13] Применение сетевых моделей для описания параллельных. // [studfile.net](http://studfile.net) [Электронный ресурс] – URL: <https://studfile.net/preview/8310328/page/6/>. (дата обращения: 31.10.2024).

[14] Анализ эффективности и надежности вычислительных // [izv.etu.ru](http://izv.etu.ru) [Электронный ресурс] – URL: [https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-8-9\\_2020-5-10.pdf](https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-8-9_2020-5-10.pdf). (дата обращения: 31.10.2024).

[15] Сорокин В.Е. Анализ моделей сетей Петри на корректную и адекватную работу // Сборник научных трудов ДОНИЖТ. – 2011. №26. [Электронный ресурс] – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-modeley-setey-petri-na-korrektnuyu-i-adekvatnuyu-rabotu> (дата обращения: 31.10.2024).

[16] Модели и методы анализа проектных решений цифровой // [new-disser.ru](http://new-disser.ru) [Электронный ресурс] – URL: <https://new-disser.ru/avtoreferats/01003307723.pdf>, (дата обращения: 31.10.2024).

[17] Имитационная модель контроля знаний в автоматизированной. // [dfedorov.spb.ru](http://dfedorov.spb.ru) [Электронный ресурс] – URL: [https://dfedorov.spb.ru/science\\_archive/fedorov-imitatsionnaya-model-](https://dfedorov.spb.ru/science_archive/fedorov-imitatsionnaya-model-)

kontrolya-znaniy-v-avtomatizirovannoy-srede-v-notatsii-setey-petri.pdf,  
(дата обращения: 31.10.2024).

[18] Санкт-петербургский государственный университет //  
disser.spbu.ru [Электронный ресурс] – URL:  
[https://disser.spbu.ru/files/2021/disser\\_yakushkin.pdf](https://disser.spbu.ru/files/2021/disser_yakushkin.pdf), (дата обращения:  
31.10.2024).

© К.Д. Чернышев, А.В. Яшонков, 2024