**Содержание**

Аннотация ........ 3

Введение ........ 4

Глава 1. Постановка задачи. Общее описание проблемы. ........ 6

1.1. Математическая модель цветной сети Петри ........ 7

1.2. Математическая модель процедуры анализа ........ 9

Глава 2. Разработка методов анализа ........ 12

2.1. Методы описания изменений ........ 12

2.2. Методы формирования отчета о последствиях ........ 15

Глава 3. Разработка программного средства ....... 19

3.1. Концепция проекта ....... 19

3.2. Описание функций программы ....... 20

Заключение ........ 24

Список литературы ........ 25

Приложения ........ 26

**Аннотация**

Тема магистерской диссертации: «Методы анализа цветных сетей Петри». Предметом исследования являются цветные сети Петри. Цель работы - разработать методы анализа цветных сетей Петри в условиях изменения свойств модели вне заданных переделов и создать программную систему для демонстрации результатов исследования.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и приложений.

Во введении раскрывается актуальность выбранной темы и обозначается цель работы. В первой главе описаны задачи исследования и математические модели цветной сети Петри, методов и процедуры анализа. Во второй главе рассматривается реализация методов анализа моделей, описываются конкретные способы и подходы к применению этих методов. Третья глава посвящена описанию реализованной программы, набора функций, спобов применения методов анализа и результатов экспериментов.

В заключении сформулированы выводы по результатам исследования.

Объем дипломной работы: Х страниц, на которых размещено Х рисунков и Х таблиц. При написании диплома использовалось Х источников.

**Введение**

Сети Петри – математический аппарат для моделирования динамических дискретных систем с параллельными взаимодействующими компонентами. Основные понятия в теории сетей Петри: позиции, переходы и токены (маркеры, метки).

По определению, модель – это упрощенное представление реального процесса или явления. Процедура моделирования всегда связана с принятием некоторых допущений относительно рассмотрения свойств и параметров реального объекта исследования. В модель вносятся только те особенности описываемой системы, которые считаются важными для решения текущей задачи.

В процессе работы с моделью может потребоваться исследование неучтенных ранее особенностей рассматриваемого процесса или явления. Получение ответа на вопрос «А что если?» подразумевает внесение изменений в модель и сбор информации о последствиях.

Преобразования модели можно разделить на две группы: изменение значений параметров сети (количественные) и изменение ее структуры (качественные). Анализ последствий позволяет оценить степень важности каждого нового неучтенного варианта развития событий в рамках проводимых исследований, что в свою очередь может привести к необходимости пересмотра модели.

Цель данной работы – разработать методы анализа цветных сетей Петри в условиях изменения свойств модели вне заданных переделов и создать программную систему для демонстрации результатов исследования.

**Глава 1.**

Сети Петри являются инструментом для моделирования динамических дискретных систем. В процессе создания модели принимаются решения не только о том, какие свойства и процессы реального объекта исследования попадут в модель, но и какие параметры этих процессов будут учтены и рассмотрены.

В качестве примера рассмотрим процесс поступления грузов на склад. Однотипные грузы упаковываются в контейнеры, которые отправляются в хранилище. Модель описывает процедуры приема грузов, их сортировку, упаковку и отправление контейнера, если в нем больше не осталось места. Известно, что грузы, которые бывают 3 типов, приходят на склад каждые 2 дня. Количество груза всегда примерно одинаковое – известны объемы для каждого типа. Контейнеры одинаковые и известен их объем.

Неучтенные свойства рассматриваемого реального процесса: кража на складе; поломка объектов имущества, не позволяющая принимать, сортировать или отправлять грузы в контейнерах; временная задержка работы всего склада из-за проблем с электричеством, появление нового типа груза и т.д.

Неучтенные параметры рассмотренных свойств и процессов: приход груза каждые 3,4,5 дней; разное количество грузов, пришедших с очередной партией и т.д.

Причины появления множества значений параметров и свойств описываемой системы, не вошедших в модель: недостаток информации об описываемой системе или решение об отсутствии необходимости внесения их в модель.

В процессе работы с моделью, может возникнуть необходимость рассмотрения ранее неучтенных свойств и параметров описываемой системы. Это может быть связано с получением новой информации об объекте исследования или с повышением уровня важности рассмотрения отдельных его частей, свойств или параметров.

Внесение изменений в модель, с целью добавления новых свойств и параметров, с последующим изучением последствий для модели будем называть анализом сети.

В данной работе предлагаются методы проведения анализа сети, подходы к описанию исследуемых изменений и применению их к существующей модели. Для иллюстрации работы анализа и обоснования эффективности предложенных методов разработана программная система.

**Актуальность исследования** заключается в том, что предложенные методы анализа сетей Петри позволяют исследовать уже готовые модели и оценивать последствия внесения в них неучтенных параметров. Подобный инструмент может быть использован для решения следующих задач:

* При появлении новой информации о системе, необходимо принять решение о внесении соответствующих изменений в модель. Необходимость их внесения может быть исследована с помощью применения предложенных методов анализа сети.
* Исследование теоретически возможных изменений исследуемого объекта и их последствий.

**Предмет исследования**: цветные сети Петри.

**Цель работы:** разработать методы анализа цветных сетей Петри в условиях изменения свойств модели вне заданных переделов и создать программную систему для демонстрации результатов исследования.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие **задачи**:

* исследование теории и описание математической модели цветных сетей Петри
* разработка и описание методов анализа цветной сети Петри, описание математической модели анализа.
* разработка программной системы для демонстрации результатов применения предложенных методов
  1. **Математическая модель цветной сети Петри**

Сеть Петри определяется пятеркой , где

,  - множество позиций;

,  - множество переходов;

 - функция следования;

 - функция предшествования;

 - начальное маркирование (состояние) сети;

 - множество положительных целых чисел.

Функции  и  задают множества дуг  и  соответственно.

Дуги, предшествующие позиции , обозначим множеством , а дуги, предшествующие переходу , множеством .

Здесь запись  означает наличие дуги , а запись  - дуги . Аналогично, дуги, следующие из  и , представим множествами , .

Входные позиции перехода  объединяются в множества его предшественников , а выходные позиции – в множества позиций–последователей .

Маркирование сети представляется вектором , где  - число меток в позиции . Переход  возбужден при маркировании  и может сработать, если выполняется условие , то есть число меток  больше или равно числу дуг , что соответствует .

Срабатывание перехода  приводит к тому, что каждая позиция  теряет  меток, а каждая из позиций  получает  меток.

Цветная сеть Петри отличается тем, что токены могут быть разных типов. Также, токены могут иметь параметры – значения свойств соответствующих типов токенов.

 – множество типов токенов.

 – каждый тип токена описывается набором свойств. Каждое свойство может принимать значения из некоторого множества:.

Представление токена в модели: - вектор конкретных значений свойств токена и указание типа токена.

Маркирование сети теперь представляется следующим образом: , где - множество токенов в позиции .

Функции предшествования и следования теперь зависят от токенов. Для функций предшествования описывается требуемое множество токенов во входной позиции, а для функций следования – множество токенов, перемещаемых в соответствующую выходную позицию.

* , 
* , 

Переход  возбужден при маркировании  и может сработать, если выполняется условие , - когда в каждой входной позиции находятся требуемые для входной функции токены.

При срабатывании перехода  приводит к тому, что каждая позиция  теряет  токенов из , а каждая из позиций  получает  меток из .

Для расширения функциональности сетей Петри могут быть введены дополнительные свойства и параметры. В данной работе рассматриваются параметры задержки для переходов. Задержки описываются вектором , где .

Срабатывание перехода теперь зависит от значения параметра его задержки.

Для обозначения шага выполнения сети введем обозначение  Каждая из позиций  получает  меток из не на текущем шаге step выполнения сети Петри, а на шаге.

Введение цветных сетей Петри повышает удобство моделирования и позволяет описывать более сложные процессы и явления. Чем сложнее становятся модели, тем сложнее становится человеку предсказать зависимости в поведении системы. Описывая сложную систему, разработчик сталкивается с необходимостью разделять ее на более мелкие части и описывать их по-отдельности. Также, разработчик не может учесть всех возможных вариантов и ситуаций в системе – реализуется только та часть функциональности, которая считается важной (по определению модель – это упрощенное представление реального процесса).

Как результат – модель системы не предусматривает определенное множество сценариев работы и изменение значений параметров в некоторых пределах. Без проведения специальных исследований, предсказать хотя бы примерные последствия этих сценариев и изменений невозможно из-за сложности модели.

Заметим, что неучтенные свойства и параметры описываемого процесса можно разделить на две группы:

1. Параметрические – это когда не рассмотрены параметры и свойства элементов построенной модели, т.е. ее внутренних элементов.
2. Конструктивные – когда определенная функциональность вообще не рассмотрена при построении модели, т.е. ни один элемент сети не имеет отношения к данному свойству реального процесса или системы.

В данной работе рассматриваются параметрические изменения модели.

**Глава 2. Модель анализа.**

При разработке программных средств анализа цветных сетей Петри в условиях изменения свойств модели вне заданных переделов, необходимо реализовать представление предполагаемых изменений, описать структуру вывода результатов о проведенном анализе и реализовать сам алгоритм анализа.

Процедура анализа предполагает наличие готовой модели какого-либо процесса, описанной цветной сетью Петри. Также, должны быть средства для работы с моделью, реализующие запуск выполнения сети, сбор данных о маркировании сети в любой момент времени и выполнение определенного сценария работы модели.

Средство анализа должно быть интегрировано в существующее средство моделирования и должно иметь возможность изменять параметры сети и выполнять все необходимые операции по управлению процессом выполнения сценария работы модели.

Один из вариантов интеграции является разработка специальных интерфейсов в существующем средстве моделирования, с целью реализации всех необходимых операций анализа, таких как: изменение параметров элементов сети, возврат сети в первоначальное положение, доступ ко всем данным текущего маркирования сети и т.д.

* 1. **Модель изменений**

Анализ цветных сетей Петри в условиях параметрических изменений свойств модели вне заданных переделов опирается на допущение, что не весь диапазон возможных значений параметров сети был учтен при разработке модели.

В общем представлении, изменение параметра сети представляет собой указание ее элемента, набор значений параметров, которые нужно установить, и момент времени, в который нужно применить изменения. Так как Сеть Петри определяется пятеркой N = {P,T,J,O,M} – поэтому изменения параметров можно разделить на пять групп:

1. изменение параметров позиций.
2. изменение параметров переходов.
3. изменение параметров функций следования.
4. изменение параметров функций предшествования.
5. изменение параметров маркирования сети.

Позиция в сети Петри отвечает за расположение токенов. Возможные изменения для позиции: незапланированная потеря или появление токена Тип токена, набор значений его параметров и время появления/потери являются параметрами изменения.

Для описания изменения позиции введем следующие обозначения:



,где с- количество токенов, operation означает появление (значение 1) или удаление (значение 2) токена, а step - это шаг сети, на котором требуется применить изменение.

Переход в сети Петри выполняет следующие функции: проверяет готовность соответствующих функций предшествования к выполнению (готовность всех функций означает готовность перехода к активации), вызывает срабатывание функций следования, связанных с этим переходом. Одним из параметров перехода может быть задержка работы – при наличии задержки, переход срабатывает не мгновенно, а через определенное количество времени или тактов работы сети.

Возможные изменения для перехода: изменение задержки выполнения, временное или постоянное прекращение работы, временное или постоянное безусловное срабатывание (независимо от функций предшествования).



где sleep – значение параметра задержки, operation: значение 0 – переход не выполняется, значение 1 – переход выполняется безусловно, Steps – диапазон применения изменения.

Функция следования определяет токены, которые появятся в указанном состоянии после активации и срабатывания соответствующего перехода. Возможные изменения для функции следования: изменение параметров уже указанных в функции токенов, изменение количества указанных токенов, удаление существующих или добавление новых токенов, постоянный или временный отказ в работе или безусловное выполнение.



где, operation: значение -1 – функция не работает, значение 1 – функция срабатывает безусловно, значение 0 – функция работает в «обычном режиме», Steps – диапазон применения изменения.

Изменение функции предшествования описываются таким же образом:



Заметим, что применение изменений к функциям описывается с помощью множества токенов  – для упрощения модели будем полагать, что при применении изменения, множество токенов функции меняется на указанное в изменении.

Маркирование сети однозначно определяет состояние сети в каждый такт времени. Так как маркирование есть совокупность токенов во всех состояниях, то изменение маркирования – это изменение состояний. Возможное изменение маркирования сети состоит из комбинации изменений ее состояний. Как параметр может быть использован временной интервал.

 ,где  – набор изменений для позиций, step - шаг применения изменения.

* 1. **Модель последствий**

Анализ изменений подразумевает наличие инструмента сбора данных о соответствующих последствиях. Для описания результатов анализа вводятся параметры последствий.

Параметры последствий описывают условия собора статистики и то, какая информация попадает в отчет. Общим, для всех групп параметров может являться указание критических значений свойств объектов сети. При достижении указанных значений, в статистике добавляется пометка «Критично». Введение специальных пометок позволяет разработчику при оценке результатов анализа акцентировать внимание только на критических ситуациях для модели.

Классификация параметров последствий проводится по следующим группам:

1. Параметры последствий для позиций.
2. Параметры последствий для переходов.
3. Параметры последствий для маркирования сети.

Возможные данные для статистики: указывается тип токена, возможно указание значений (диапазонов значений) для токена и интересующие показатели – максимальное количество, текущее количество подобных токенов в состоянии. Временные параметры могут указывать в какой (какие моменты или временные диапазоны) собирать статистику.

Также, разработчик может быть заинтересован в анализе последствий касающихся нескольких групп одновременно. На формирование отчета о последствиях могут быть наложены функциональные зависимости от параметров последствий. Например: разработчика интересует только случаи, когда в определнной позиции находятся более чем 10 токенов определенного типа с определенными свойствами, но только при условии что определенный переход сработал не более 20 раз.

Для описания подробных последствий введем следующее обозначение. TODO: [новая формула]

Как и в случае с параметрами изменения, в случае последствий можно ввести временную характеристику. Она показывает, что разработчика интересуют последствия примененных изменений только после прогона модели определенное количество шагов. Введем следующее обозначение. TODO: [новая формула]

Процедура анализа может быть описана следующим образом: разработчик описывает параметры возможных изменений для модели, описывает интересуемые последствия для сети и запускает сеть Петри. Процедура анализа применяет изменения в соотвествии с указанными параметрами (шаг выполнения сети, параметры сети, которые нужно изменить) и собирает статистику последствий в соответствии с указанными параметрами для последствий.

В итоге разработчик имеет возможность оценить статистику последствий и соответствующие примененные изменения. Стоит заметить, что статистика последствий может быть использована не только с целью обнаружения критических для сети изменений, но и с целью получения готовых вариантов решения возникающих проблем. Если итогом применения изменения «И1» становится возникновение критической ситуации, то примененное изменение «И2» решает возникшие проблемы и дальнейшее выполнение сети Петри не сталкивается с критическими ситуациями.

Для описания модели процесса анализа введем следующие обозначения. TODO: [новая формула]

Процесс анализа теперь формально можно описать как: TODO: [новая формула]

Предложенный анализ является инструментом исследования уже готовых моделей, построенных на основе цветных сетей Петри. Механизмы анализа не вносят изменений в структуру сети, но изменяют ее параметры. Следующим шагом в развитии теории подобного анализа сетей Петри может быть исследование изменений самой струкруры сети, когда имеется возможность удалять/добавлять состояния, переходы и функции переходов.

**2.3. Методы проведения анализа**

Перед проведением анализа, необходимо подготовить существующую систему моделирования к возможности внесения изменений во все элементы сети на любом этапе выполнения ее модели.

Требуемая функциональность вводимых интерфейсов для взаимодействия с моделью определяется параметрами изменений, параметрами последствий и алгоритмом анализа. В общем случае процесс анализа должен иметь возможность изменить данные в модели, получать доступ к требуемой информации, запускать и останавливать выполнение сети.

Процедура анализа оперирует описанными параметрами изменений, для внесения корректировок в модель, и параметрами последствий, для анализа поведения модели в новых условиях.

В общем случае процедуру анализа можно описать следующей последовательностью шагов:

1. Формируется сеть с начальными параметрами.
2. К сети применяются изменения, подходящие по параметрам.
3. Запускается выполнение сети.
4. На каждом следующем шаге применяются изменения, подходящие по параметрам. Подходящие параметры последствий отвечают за формирование статистики по каждому шагу выполнения.
5. При достижении конечного для данной модели шага сети, сохранятеся статистика по текущему циклу анализа.
6. Переход на 1 шаг. Условие останова и выхода их процедуры анализа – выполнение всех установленных комбинаций параметров изменения.

Введение комбинаций параметров изменения позволяет применять не все изменения сразу, а сочетать их разным образом, для более подробного анализа модели. Комбинации могут быть построены полным перебором всех параметров изменения, или с применением специальных алгоритмов выбора изменений.

Каждый параметр последствий по определению является описанием важной для модели ситуации, поэтому комбинирование параметров последствий может привести к потере важных статистических данных.

При анализе модели, возможно использование свойств сетей Петри, таких как достижимость, ограниченность, сохраняемость и живость. Проверка этих свойств может позволить не выполнять сеть и сразу указать некоторые последствия для сети, такие как количество срабатываний перехода, количество токенов в позициях и т.д.

Задача анализа динамических изменений в общем случае не является оптимизационной задачей. Применение каждого следующего изменения может кардинально изменить модель, как в лучшую так и в худшую сторону (с точки зрения описанных критических ситуаций).

В результате анализа разработчик получает множество отчетов. Они влючают примененные изменения и данные о последствиях. Необходимо иметь систему удобного просмотра собранной статистики, как часть общей системы анализа. После проведения анализа динамических изменений, разработчик получает возможность внести конструктивные дополнения в модель с целью предотвращения критических ситуаций.

Описанные методы анализа могут быть направлены не только на поиск слабых мест в системах, но и на поиск путей решения возникающих проблем. В этом случае параметрами изменений описываются предгалаемые способы решения проблемы – а собранная статистика позволяет оценить их эффективность.

**Глава 3. Разработка программного средства**

**3.1. Концепция проекта**

В качестве языка программирования был выбран язык Java. Для реализации графической части используется Swing - библиотека для создания графического интерфейса. Выбор основывается на том, что на программирование на языке Java не накладывается никаких ограничений связанных с авторскими правами и лицензиями. Плюс технологии Swing в ориентированности на создание пользовательских интерфейсов.

Программное средство разрабатывается для демонстрации работы предложенных методов анализа цветных сетей Петри. Программа должна наглядно демонстрировать возможности применения подобного анализа в моделировании динамических дискретных систем.

Для выполнения поставленной задачи требуется создать программу, которая удовлетворяет следущим требованиям:

1. Позволяет создавать модели динамических дискретных систем.
2. Использует цветные сети Петри для создания моделей.
3. Реализует предложенные методы анализа

На программную систему наложены следующие ограничения и предположения:

1. Для храниения данных используется их предствление в текстовом виде.
2. Одновременно в программе допускается работа только с одной моделью.
3. Результаты анализа представляются в виде текстовых файлов.

Сценарии использования (функциональность решения):

1. Пользователь может создать модель используя цветную сеть Петри.
2. Модель можно сохранить в файл и загрузить из файла.
3. Вместе с моделью создается база токенов – перечисление всех токенов в модели и описание их свойств. Базу токенов можно сохранить и загрузить отдельно.
4. При загруженной/созданной модели можно совершить следующие действия: выполнить один шаг сети Петри, или запустить автоматическое выполнение.
5. Выполнение можно остановить и внести изменения в структуру сети.
6. Перед выполнением анализа, пользователь вводит данные о параметрах изменения и параметрах последствий.
7. Анализ запускается и его нельзя остановить до полного завершения.
8. В системе нелья отменять внесенные изменения: удалять созданные элементы сети и описанные параметры анализа.
9. Результаты анализа сохраняются в виде текстовых файлов.

Стратегия архитектурного дизайна решения подразумевает расделение программной системы на компоненты (разделение представлено объединением «пакетов»):

1. “core, fileSavers ...” - отвечает за представление всех элементов цветной сети Петри, сохранение их в файлы
2. “constructor, graphicalElements” – отвечает за графическое представление конструктора для сети Петри
3. “staticNet, liveNet” – отвечает за выполнение сети Петри
4. “dynamic” – отвечает за анализ сети петри, включая формирование параметров анализа

**3.2. Описание функций программы**

Функции программы можно разделить на две группы: функции моделирования и функции проведения анализа. Моделирование позволяет описывать динамических дискретных систем с использованием цветных сетей Петри. Основные функции моделирования:

- Создание токена. При создании токена указывается его название и свойства. Свойство может быть числом или строкой. При задании свойства указывается его тип, и значение. Созданный токен попадает в базу токенов. Далее, для использования этого токена в описании параметров сети или анализа реализована функциональность выбора токена из базы. Если создается токен и его имя уже встречалось ранее – к имени добавляется символ “#”. Если создается токен который уже был в базе (имя и свойства полностью совпадают) – токен в базу не добавляется.

- Создание состояния. Состояние определяется только своим названием.Учет состояний не ведется, проверки на совпадения имен не выполняются. Все имена должны быть уникальны – это ограничение программы.

- Создание перехода. Переход определяется только своим названием. Учет переходов не ведется и проверок на совпадение названий нет. Также как и в случае с состоянием – необходимо чтобы все переходы имели уникальные названия. Параметр перехода – задержка выполнения. Реализована возможность задать переход, который сраборает только один раз – на первом шаге системы. Это позволяет произвести начальное маркирование сети используя только переходы и функции следования.

- Создание функций перехода. Функции предшествования и следования имеют разную релизацию. Создание функции начинается с указания состояния и перехода (порядок означает тип функции). При создании функции указывается следующий параметры: токен (есть возможность взять из базы токенов или создать новый) и количество таких токенов. Для функции предшествования указывается возможность сохранения токена в состоянии.

- Запуск сети. Реализовано два варианта запуска сети – запуск выполнения только следующего шага и запуск выполнения с указанием временной задержки между шагами. Также реализована возможность остановить выполнение сети. Далее, можно опять запускать сеть.

Функции проведения анализа представляют следующие возможности – описать параметры изменений, описать параметры последствий, выбрать сеть для анализа, выбрать папку для сохранения результатов анализа и запустить анализ.

Реализованы следующие параметры изменения:

- параметры изменения для перехода: название перехода, диапазон изменения задержки перехода, параметры временного прекращения работы перехода – диапазон шагов сети.

- параметры изменения для функций перехода: диапазон количества токенов.

- параметры изменения состояний: потеря или появление токена, указание количества таких токенов и интервал времени (в шагах сети) через котороый изменение повторяется.

Реализованы следующие параметры последствий:

- параметры последствий для переходов: название перехода, критическое число его срабатываний и общее число его срабатываний.

- параметры последствий для состояний: указание токена, текущего количества заданных токенов в состоянии, максимальное количество одновременно присутствующих токенов заданного типа в указанном состоянии и критическое число токенов в данном состоянии, присутствующих одновременно.

При запуске анализа указывается количество шагов для запуска сети с примененными параметрами. Статистика анализа сохраняется в текстовых файлах и состоит из описания всех параметров изменений, описания примененных параметров изменений и всех данных о последствиях. Если были достигнуты критические показатели из параметров последствий – они помечаются ключевым словом «!Критично».

Алгоритм применения изменений работает следующим образом: перебираются все сочетания изменений и применяются по очереди.

**3.3. Описание эксприментов**

Для проведения экспериментов, была выбрана модель занятия рабочей станции.

Описание модели:

...

Параметры изменения:

....

Параметры последствий:

....

Результаты анализа:

...

**Заключение**

В работе решены все поставленные задачи. Результаты исследования показывают, что предложенные методы анализа цветных сетей Петри позволяют эффективно искать потенциальные «узкие» места в модели и также находить пути выхода из критических ситуаций. Подобный анализ может применяться параллельно с разработкой модели, с целью своевременного внесения изменений и недопущения возможных критических ситуаций, которые не были учтены или не могут быть учтены в процессе конструирования.

**Список литературы**

**Приложения**