Министерство образования и науки Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования**«Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Кафедра математического обеспечения вычислительных систем

УДК 004.942

**Разработка инструментальных средств для реализации многомодельного подхода в системе имитационного моделирования TriadNS***Выпускная квалификационная работа*

Работу выполнил студентка  
 группы ПМИ-1  
4 курса механико-математического факультета \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_А. А. Семеновых

Научный руководитель:  
к.ф.-м.н., доцент  
\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Е. Б. Замятина  
«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_20\_\_г.

Пермь, 2016

# Аннотация

Семеновых А. А.

Разработка инструментальных средств для реализации многомодельного подхода в системе имитационного моделирования TriadNS: Выпускная квалификационная работа. Пермь: ПГНИУ, Механико-математический факультет, Кафедра математического обеспечения вычислительных систем, 2016.

Работа включает 39 страниц пояснительной записи, 27 использованных источников, таблиц, 31 рисунок и 3 приложения.

Ключевые слова: компьютерные сети, имитационное моделирование, сети Петри, многомодельный подход, модель, метамодель, трансформация моделей.

Выпускная работа посвящена разработке средств для применения многомодельного подхода к исследованию компьютерных сетей методом имитационного моделирования. Многомодельный подход предполагает, что объект исследования может быть представлен в виде различных моделей, в основе которых лежит та или иная математическая схема. В настоящей работе компьютерные сети были представлены в виде сетей Петри, что дает возможность привлечь богатый математический аппарат для изучения их свойств (тупиковые ситуации, параллельная обработка, живость, достижимость).

Во введении формулируется цель, перечисляются задачи, которые необходимо решить для достижения цели, и методы исследования. В первой главе описано использование предметно-ориентированных языков в имитационном моделировании. Во второй главе рассмотрено понятие …. В третьей главе излагаются основные понятия, связанные с …. Наряду с перечисленным, в главе представлены различные алгоритмы преобразования графических моделей компьютерных сетей в сети Петри. Четвертая глава посвящена вопросам реализации графического интерфейса, позволяющего представлять компьютерные сети в виде разрабатываемой системы, ее возможности.

# Оглавление

[Аннотация 2](#_Toc446003478)

[Оглавление 3](#_Toc446003479)

[Введение 5](#_Toc446003480)

[Глава 1. Модельно-ориентированный подход 7](#_Toc446003481)

[2. 1. Предметно-ориентированные языки 7](#_Toc446003482)

[2. 2. Использование DSL в моделировании 10](#_Toc446003483)

[2. 3. Использование DSL в TriadNS 11](#_Toc446003484)

[2. 4. Обзор симуляторов сетей Петри 11](#_Toc446003485)

[2. 5. Выводы 16](#_Toc446003486)

[Глава 2. Сети Петри и их использование для моделирования компьютерных сетей 19](#_Toc446003487)

[2. 1. Сети Петри 19](#_Toc446003488)

[2. 2. Использование сетей Петри для моделирования 20](#_Toc446003489)

[2. 3. Представление компьютерной сети в виде сети Петри 24](#_Toc446003490)

[2. 4. Используемые правила 27](#_Toc446003491)

[2. 5. Выводы 32](#_Toc446003492)

[Глава 3. Система TriadNS 33](#_Toc446003493)

[3. 1. Архитектура системы 33](#_Toc446003494)

[3. 2. Описание модели 33](#_Toc446003495)

[3. 3. Использование онтологий 35](#_Toc446003496)

[3. 4. Язык Triad/основные особенности системы 37](#_Toc446003497)

[3. 5. Доработка системы 37](#_Toc446003498)

[3. 6. Выводы 37](#_Toc446003499)

[Глава 4. Разработка и реализация системы 38](#_Toc446003500)

[4. 1. Реализация графического редактора для работы с сетями Петри 38](#_Toc446003501)

[4. 2. Реализация средств анализа сетей Петри 42](#_Toc446003502)

[4. 3. Реализация трансформатора моделей 42](#_Toc446003503)

[4. 4. Дополнительные доработки системы 42](#_Toc446003504)

[4. 5. Планы на дальнейшую разработку 43](#_Toc446003505)

[4. 6. Выводы 43](#_Toc446003506)

[Заключение 44](#_Toc446003507)

[Библиографический список 45](#_Toc446003508)

[Приложения 46](#_Toc446003509)

[Приложение A. Требования, предъявляемые к разрабатываемой системе. 46](#_Toc446003510)

[Приложение B. Рутины сущностей модели компьютерной сети 48](#_Toc446003511)

[Приложение C. Блок-схемы рутин 49](#_Toc446003512)

[Приложение D. Иерархия классов онтологии TriadNS 50](#_Toc446003513)

[Приложение E. Фрагменты онтологии предметной области «Система проектирования и моделирования компьютерных сетей TriadNS» 51](#_Toc446003514)

# Введение

В работе рассматривается вопрос о разработке инструментальных средств для реализации многомодельного подхода в имитационном моделировании. Он предполагает, что моделируемый объект может быть представлен различными моделями, в основе некоторых из них лежат те или иные математические схемы. Так, компьютерная сеть может быть представлена в виде систем массового обслуживания (СМО), сетей Петри (СП) и другим образом, а процессы, происходящие в компьютерной сети, или алгоритмы преобразования данных могут быть описаны с использованием нотаций UML и т.д. В этом случае объект исследования рассматривается с различных точек зрения, к исследованию могут быть подключены специалисты в различных областях знаний. В результате такого многоаспектного моделирования обеспечивается создание наиболее адекватных имитационных моделей.

Таким образом, *основной целью работы* является проектирование и разработка инструментальных средств имитационного моделирования, позволяющих преобразовывать (выполнять трансформации) графические модели компьютерной сети в другие графические модели (сеть Петри, цепи Маркова, СМО) и наоборот.

*Объектом* настоящего исследования является изучение возможностей многомодельного подхода в имитационном моделировании; *предметом исследования* – графический интерфейс, позволяющий представлять КС в виде сетей Петри.

Компьютерные сети в настоящее время получили большое распространение в различных областях производства, бизнеса, науки, а также в обычной жизни (социальные сети), поэтому тщательное исследование их структуры и их свойств является *актуальным*. В настоящее время существует большое количество инструментальных средств, выполняющих имитационное моделирование КС []. Однако, на сегодняшний день, для того, чтобы применение методов имитационного моделирования было наиболее эффективным, необходимо привлекать к исследованиям специалистов из разных областей знаний.

К примеру, очень важным является тот факт, что при разработке имитационной модели исследователю необходимо оперировать терминами и понятиями, которые являются привычными для него, поэтому иногда целесообразно применять многомодельный подход, который представляет собой не что иное, как исследование объекта с разных сторон, с разных точек зрения. Такая попытка применить многомодельный подход в имитационном исследовании КС является относительно *новой*.

Предполагается, что построение модели выполняется с помощью графического интерфейса. Для преобразования моделей из одного представления в другое (трансформации) пользователь должен построить соответствующие правила. Трансформации визуальных моделей по этим правилам выполняются обычно специальными инструментальными средствами – редакторами DSL: MetaEdit, MetaLanguage и др. [].

Редакторы выполняют преобразование из одной метамодели в другую на основе горизонтальной трансформации графов. Причем описание правил преобразования моделей должно производиться в терминах исходного и целевого языков моделирования, понятных различным категориям специалистов. Кроме того, достаточно часто появляется необходимость преобразования визуальной модели в некоторое текстовое представление, например, в исходный код на целевом языке программирования, и обратно.

Задачи, которые необходимо решить для выполнения работы:

* разработка визуального языка для сетей Петри
* разработка правил трансформации из модели компьютерной сети в сеть Петри
* разработка инструментального средства для трансформации моделей в системе TriadNS

Для решения поставленных задач могут быть использованы теория сетей Петри, теория графов, теория формальных грамматик, методы построения предметно-ориентированных языков (DSL).

Поскольку модель КС может быть связана с конкретной предметной областью, т.е. описана в терминах одного из предметно-ориентированных языков, следует более подробно рассмотреть вопросы, связанные с предметно-ориентированными языками (DSL) и модельно-ориентированным подходом в разработке программного обеспечения (ПО).

# Модельно-ориентированный подход

Традиционные средства разработки информационных систем (ИС) в настоящее время все больше и больше не удовлетворяют потребности создания новых ИС, применяемые в новых областях, автоматизирующие новые виды деятельности, поэтому наиболее востребованными становятся инструментальные средства, основанные на применении модельно-ориентированного подхода. Такие средства позволяют объединить усилия разработчиков и экспертов в предметной области, снизить трудоемкость создания и сопровождения и сделать ИС более гибкими. Гибкость также достигается за счет того, что при изменении модели не нужно переписывать программный код системы, ее поведение изменяется вместе с моделью.

Модельно-ориентированный подход предполагает наличие хотя бы одной модели. В данном случае модель – это абстрактное описание системы, в котором отражены существенные с точки зрения решаемых ее разработчиком задач характеристики, особенности функционирования [10]. Модель создается с использованием определенных языков моделирования, чаще всего визуальных, так как они наглядны и понятны не только программистам, но и экспертам в предметной области, конечным пользователям.

Существуют реализации МОП, которые используют языки моделирования общего назначения для построения моделей, однако они сложны для понимания не только для экспертов в конкретной предметной области, но даже иногда для разработчиков. Именно поэтому в модельно-ориентированной разработке ПО все более широко применяются визуальные предметно-ориентированные языки моделирования (Domain-Specific Modeling Languages – DSML, Domain-Specific Languages – DSL), предназначенные для решения определенного класса задач в конкретной предметной области.

## Предметно-ориентированные языки

Предметно-ориентированный язык (Domain Specific Language, DSL) – язык программирования, созданный для использования в рамках конкретной предметной области. Примерами таких языков могут быть Excel, AutoCad, ProEngineer, Mathematica и др.

DSL просты в использовании, а также понятны пользователям, так как они оперируют терминами предметной области. Это позволяет упростить процесс написания программ, а также программировать «не программистам». Однако DSL обладают существенным недостатком – сложность разработки и, в отличие от языков общего назначения, их нельзя использовать вне конкретной предметной области, поэтому для каждой предметной области, либо задачи, необходимо создавать новый DSL.

DSL отличается от языков общего назначения, так как при их разработке необходимо создавать и собственные полнофункциональные среды для работы с ними, т.е. удобный графический редактор или редактор кода, а также удобный отладчик программ. Для решения этих проблем в последнее время стал активно развиваться новый тип программного обеспечения – языковые инструментарии (language workbenches).

Предметно-ориентированный язык – это язык программирования с ограниченными выразительными возможностями, ориентированный на некую конкретную предметную область. DSL поддерживает минимум возможностей, необходимых для поддержки своей предметной области. Фаулер делит предметно-ориентированные языки на три основные категории: внешние DSL, внутренние DSL и языковые инструментальные средства [].

Внешний DSL – язык, отделенный от основного языка приложения. Как правило, внешний DSL имеет пользовательский синтаксис, но при этом достаточно широко применяется синтаксис другого языка. Сценарий анализируется кодом принимающего приложения с помощью методов синтаксического анализа текста. Такой DSL трансформируется в приложение с помощью компилятора или интерпретатора. Примерами внешних DSL являются регулярные выражения, SQL, XML-файлы.

Внешние DSL обеспечивают возможность использовать любой синтаксис: можно выразить предметную область в удобной и простой форме. Формат такого DSL будет ограничен лишь созданием транслятора для этого языка. Если язык несложный, то это не составит особого труда, но более сложный язык потребует и больших усилий.

Недостатком можно назвать и тот факт, что внешний DSL никак не связан с основным языком приложения и программная среда ничего не знает о данном DSL. Этот недостаток обеспечивает неудобство при написании кода нового языка, при отладке и так далее.

В случае внешнего DSL имеется четкая граница между предметно-ориентированным языком и языком общего назначения. Языки могут быть ориентированы на предметную область и при этом оставаться языками общего назначения.

Внутренний DSL – это специфический способ использования языка общего назначения. Внутренние DSL еще называют «встроенными» (embedded). Сценарий во внутреннем DSL представляет собой корректный код языка общего назначения, который использует только подмножество возможностей этого языка в определенном стиле, чтобы работать с одним небольшим аспектом всей системы. Результат должен иметь вид исходного текста пользовательского, а не базового языка. Примером этого стиля является Lisp.

Достоинства и недостатки использования внутренних DSL являются зеркальным отражением внешних DSL.

Ограничительные возможности для внутренних DSL связаны прежде всего с тем, что внутренние DSL сами по себе являются языком общего назначения. При формировании выражения DSL ограничения возникают из-за использования небольшого подмножества всех возможностей языка программирования общего назначения. Обычно в этом случае стараются избегать условных конструкций, циклов и переменных.

Внутренние DSL являются наиболее доступной для написания формой DSL: не нужно изучать грамматику и синтаксический анализ, как при освоении внешних DSL, а в отличие от языковых инструментальных средств не нужны специальные инструменты для работы. Используя внутренний DSL, происходит работа в обычной языковой среде.

Однако использование внутренних DSL ограничено базовым языком: так как любое выражение должно быть корректным выражением базового языка, особенности применения внутреннего DSL тесно связаны с возможностями языка общего назначения.

Возможность использовать для DSL все инструменты основного языка программирования является двоякой. С одной стороны, если программист хорошо владеет данным языком, то никаких проблем не возникает. Однако преимущество DSL состоит в том, чтобы программировать, не зная возможностей базового языка. Внутренний DSL может усложнить процесс, если программист недостаточно знаком с возможностями базового языка.

Языковые инструментальные средства – специализированные интегрированные среды разработки для определения и создания DSL. В частности, языковые инструментальные используются не только для определения структуры DSL, но и как пользовательские среды редактирования для людей, которые будут писать сценарий DSL. Получающиеся в результате сценарии тесно объединяют среду редактирования и язык.

Преимущества использования DSL:

1. Главное преимущество в использовании языка DSL это то, что он предоставляет средства для более ясного выражения назначения части системы. Ограниченные выразительные возможности DSL усложняют написание неправильного кода и облегчают поиск сделанных ошибок;
2. Предоставляет ясный и точный язык предметной области, в том числе для общения с заказчиками и пользователями программного обеспечения.

Недостатки:

1. Для создания DSL необходимо разрабатывать полнофункциональные среды, для работы с ними;
2. DSL нельзя применять вне конкретной предметной области, а для решения иных задач нужно создавать новый DSL.

## Использование DSL в моделировании

Модель – это абстрактное представление системы, определенное на языке моделирования [].

Метамоделирование – это процесс полной и точной спецификации предметно-ориентированного языка моделирования (DSML), который используется для определения модели в терминах конкретной предметной области. Метамодель описывает абстрактный синтаксис языка моделирования и определяет язык метамоделирования, наиболее подходящий для описания новых языков моделирования. Метамодель языка метамоделирования называется мета-метамодель. Трехуровневую структуру, представленную моделью, метамоделью и мета-метамоделью, можно представить в виде диаграммы. Такой шаблон разработки может применяться несколько раз: модели на уровне n задаются с помощью языка, определенного как метамодель на уровне n+1. Также используют четырехуровневую структуру, в которой внешним (четвертым) уровнем являются сами данные, построенные в соответствии с моделью.

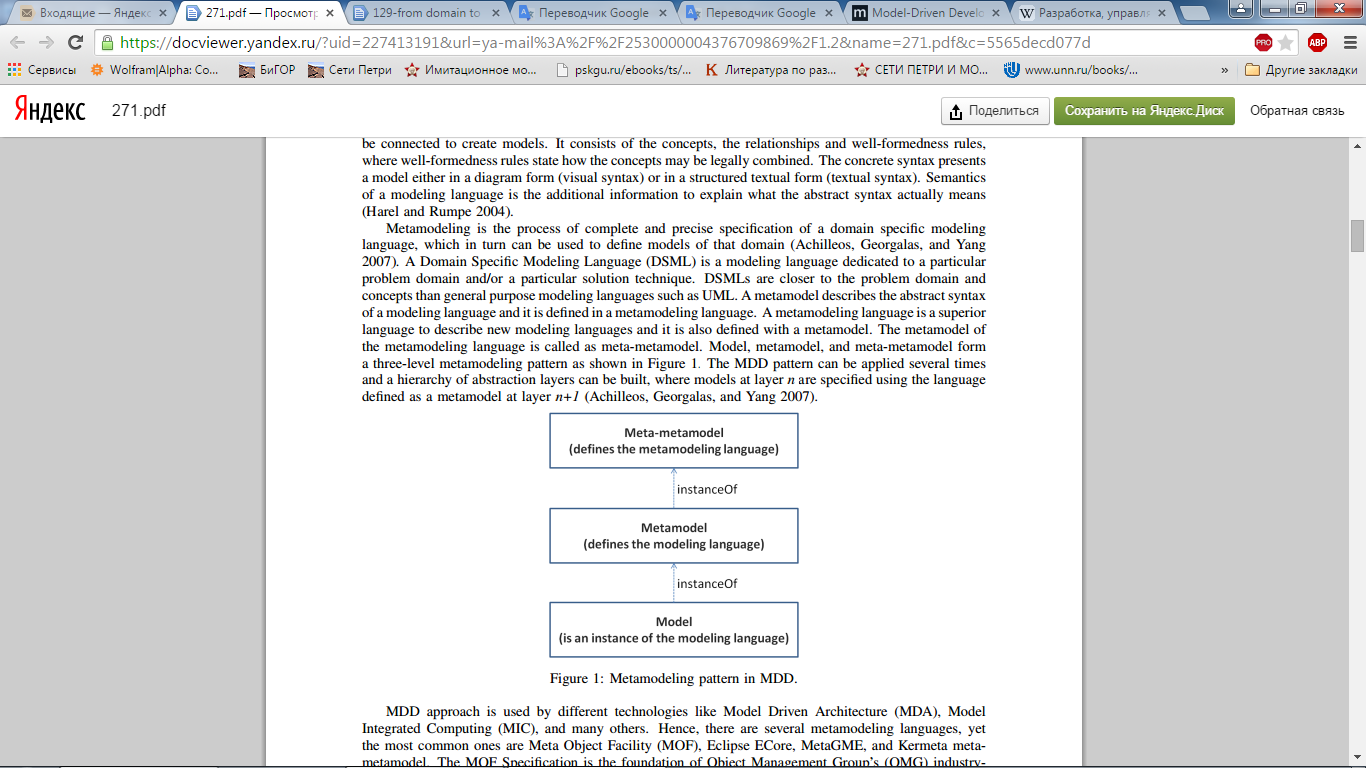


Рисунок 1. Диаграмма метамоделирования []

Такой подход используется в различных технологиях разработки, например, в модельно-ориентированном подходе (Model Driven Architecture, MDA).

Инструмент моделирования обеспечивает пути для развития моделей, основанных на языке моделирования. В большинстве случаев, графические инструменты моделирования включают дополнительные инструменты, такие как: преобразование модели, компилятор, интерпретатор, отладчик и др. В этом случае весь набор инструментов называется средой моделирования. Среда метамоделирования – это инструмент для разработки инструмента моделирования, определенного метамоделью. Полученные инструменты могут работать как в среде метамоделирования, так и в качестве отдельных программ. Метамоделирование также называют предметно-ориентированным моделированием (DSM).

Как только модели построены в соответствии с некоторой метамоделью, можно выполнять трансформацию моделей, т. е. переход от некоторой исходной модели в целевую модель на основе некоторых правил.

Иногда для устранения недостатков языков моделирования в процессе разработки DSL создают метаязык, благодаря чему возможно настраивать язык, повторное использование DSL, интеграции нескольких языков в одной системе, а также трансформация моделей с одного языка моделирования на другой [19].

## Использование DSL в TriadNS

TriadNS разрабатывается на языке общего назначения C# в среде Visual Studio.

В качестве внутреннего предметно-ориентированного языка в TriadNS выступает язык имитационного моделирования Triad.Net. Как и любой внутренний язык, Triad.Net является языком общего назначения, но в данном случае он определяется с помощью инструментальных средств другого языка – C#.

Внешним языком для системы является визуальный, с помощью которого строятся модели в TriadNS. На данный момент в TriadNS возможно построение моделей компьютерной сети, сети Петри, систем массового обслуживания в виде графа. Формальные языки описания данных моделей и будут внешними DSL, которые обрабатываются с помощью инструментальных средств языка C#.

В качестве метамодели для внешних DSL выступают онтологии предметных областей. На основе этих метамоделей происходит построение моделей. В качестве мета-метамодели выступает базовая онтология Triad.Net.

Рисунок 2. Структура DSL сетей Петри

## Обзор симуляторов сетей Петри

Теория сетей Петри со времени диссертации доктора Карла Петри в 1962 г. значительно развилась. С этого времени было создано достаточно много редакторов, позволяющих строить различные виды сетей Петри, и симуляторов, производящих моделирование их поведения [5].

В данной главе будут рассмотрены симуляторы, которые сравниваются по следующим выбранным критериям:

1. Удобство построения и представления сетей Петри в графическом редакторе;
2. Визуализация процесса моделирования;
3. Ручной запуск переходов в процессе моделирования;
4. Наглядное отображение результатов анализа и моделирования сетей Петри;
5. Использование различных видов сетей Петри;
6. Стоимость системы;
7. Дополнительные возможности (многоплатформенность и др.)

Главными критериями при анализе симуляторов являются, прежде всего, удобство построения модели, ее графическое представление в системе, а также наглядность моделирования. Дополнительным критерием в сравнении симуляторов в процессе симуляции является возможность ручного управления процессом, так как иногда при исследовании систем необходимо отследить определенные условия. Критерий стоимости системы также учитывается, потому что в работе рассматриваются как платные, так и бесплатные симуляторы. Также не рассматриваются системы имитационного моделирования общего назначения, для которых можно задать любую модель.

Сети Петри достаточно часто используются в качестве математического аппарата либо дополнительной модели для исследования в различных системах, занимающихся моделированием, как платных, так и бесплатных [4, 3]. Существует множество симуляторов сетей Петри, модели в первых из них представлялись в виде текста [12], а работа и вывод результатов велась с помощью консоли.

В данной работе будут рассмотрены следующие симуляторы: Alpha/Sim, Jsarp, QPNet, Renew и Yasper. Выбор именно этих продуктов обусловлен тем, что в настоящее время они достаточно широко развиваются. При их реализации учитывались особенности симуляторов на тот момент времени, и рассматривать системы-предшественники или схожие системы не имеет смысла. На их основе будет произведен сравнительный анализ по выбранным критериям.

Данный обзор позволит рассмотреть достоинства и недостатки различных симуляторов сетей Петри для расширения возможностей построенного редактора сетей Петри в системе TriadNS, а также его последующей интеграции с редактором для трансформации моделей в системе.

1. Alpha/Sim

Alpha/Sim – это средство моделирования дискретных систем общего назначения, основанное на математическом аппарате сетей Петри [8]. С помощью системы можно строить и отлаживать модели в графическом виде, отслеживать результаты в любой точке процесса выполнения моделирования, а также сохранять модели и результаты имитации.

Симулятор поддерживает выполнение множества функций анализа сетей Петри, а также использование сетей Петри различных видов. Более того, пользователь сам может написать функции, необходимые ему при анализе, либо импортировать уже написанный программный код.

Построение модели в Alpha/Sim достаточно удобно и происходит графически (рис. 3). Пользователю не нужно писать ни строчки кода, а только перетаскивать пиктограммы в нужное место и задавать параметры.

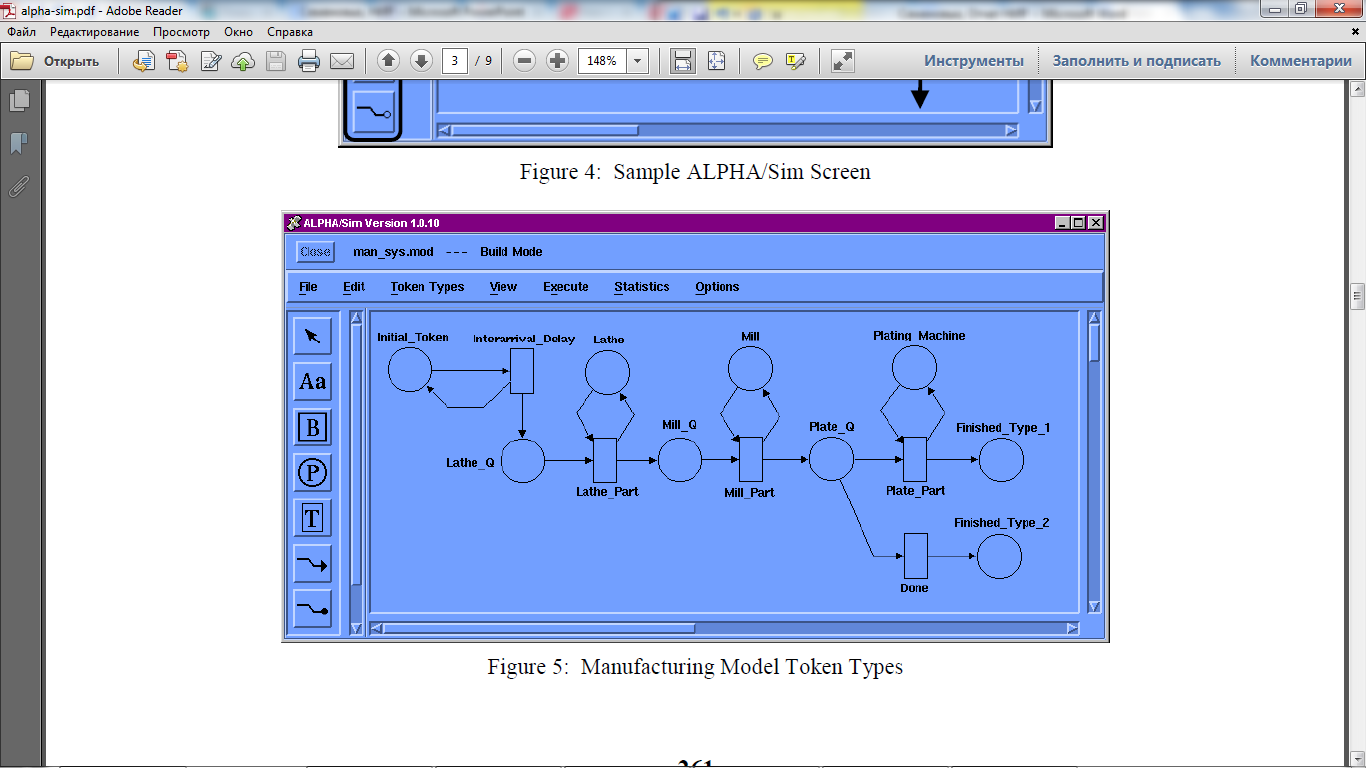


Рисунок 5. Проектирование СП в Alpha/Sim [8]

Перед выполнением симуляции Alpha/Sim автоматически проверяет модель на наличие ошибок, а симуляцию можно остановить на любом шаге выполнения или запустить без остановок. Однако при таких широких возможностях в процессе имитации нельзя запускать переходы вручную.

Результаты моделирования выводятся на экран или сохраняются в файл для дальнейшего анализа. Модель также можно просмотреть в виде дерева для удобной навигации.

Симулятор может быть запущен на персональном компьютере под платформой Windows или на серии рабочих станций (SUN Workstation) под SunOS, Solaris или Motif.

Недостатком рассматриваемого симулятора также может служить его стоимость. Он не распространяется бесплатно, не предоставляет открытый доступ к коду.

1. Jsarp

Jsarp – анализатор и симулятор сетей Петри, разработанный в Государственном университете Рио-де-Жанейро. Он обладает достаточно мощными средствами для анализа обыкновенных сетей Петри. Система еще развивается и находится на стадии расширения функционала: планируется добавить моделирование временных, стохастических сетей Петри [2].

Симулятор написан на языке Java, что позволяет использовать его на многих платформах, поддерживающих данную среду, а также с легкостью добавлять различные библиотеки, использовать шаблоны и интегрировать с другими системами. JSarp является бесплатным и предоставляет открытый доступ к программному коду [1].

Проектирование и моделирование сетей Петри в графическом редакторе симулятора происходит достаточно просто (рис. 4). Моделирование возможно остановить на любом шаге, а также вручную запустить любой переход. В процессе имитации выводится информация, в которую входит дерево достижимости, данные об элементах сети и т.д. После проведения моделирования пользователь может воспользоваться инструментами для анализа и проверить интересующие свойства сети Петри.

Построенную модель можно сохранить в файл формата XML для последующей работы с ней.

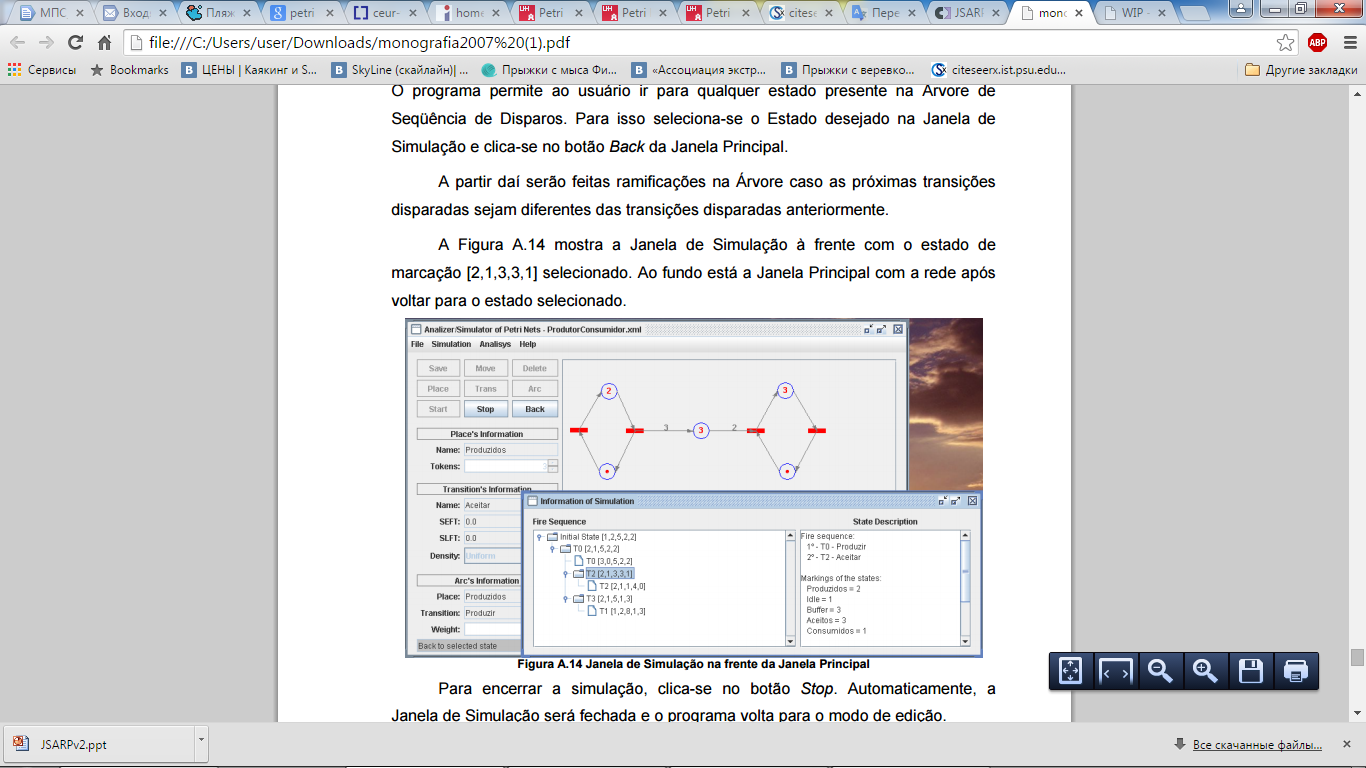


Рисунок 6. Симуляция в JSarp [1]

1. QPNet

QPNet – эмулятор сетей Петри, реализованный в «Московском государственном институте радиотехники, электроники и автоматики». Данная система позволяет строить сети Петри, а также сохранять построенные модели в формате XQP.

Основные особенности эмулятора является его кроссплатформенность, высокая производительность [15]. QPNet разрабатывался с помощью библиотеки QT в среде C++. Данная система распространяется бесплатно и постоянно улучшается, также реализованы функции сбора статистики и задания некоторых распределений для веса дуги и задержки перехода.

Интерфейс системы для построения и моделирования модели достаточно удобен и понятен для пользователя (рис. 5), однако, система находится еще на стадии тестирования и расширения функционала. За счет этого вывод результатов, в том числе в процессе симуляции, происходит не достаточно наглядным способом. Система поддерживает моделирование синхронных сетей Петри, а также временных и стохастических СП.

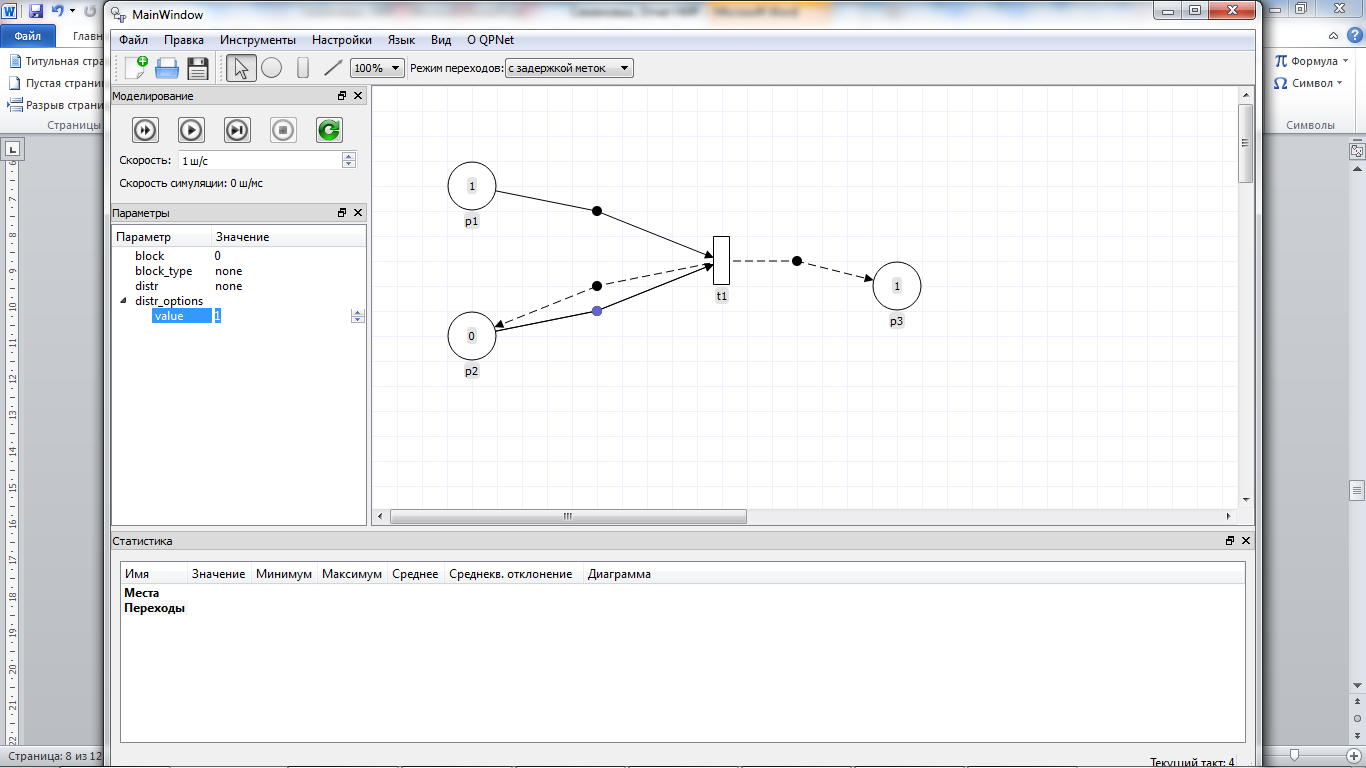


Рисунок 7. Интерфейс системы QPNet

1. Renew

Симулятор Renew предназначен для моделирования сетей Петри высокого уровня, написанный на языке Java, что позволяет использовать его на многих современных операционных системах [11]. Также система предоставляет открытый доступ к программному коду, поэтому она может быть расширяема третьими лицами. Renew – это учебная программа, она постоянно расширяется и улучшается, происходит исправление ошибок.

Как и во многих симуляторах сетей Петри, Renew имеет графический редактор, позволяющий достаточно просто проектировать различные виды сетей Петри (рис. 6). Также наряду с обычными инструментами для построения модели можно использовать возможности языка Java.

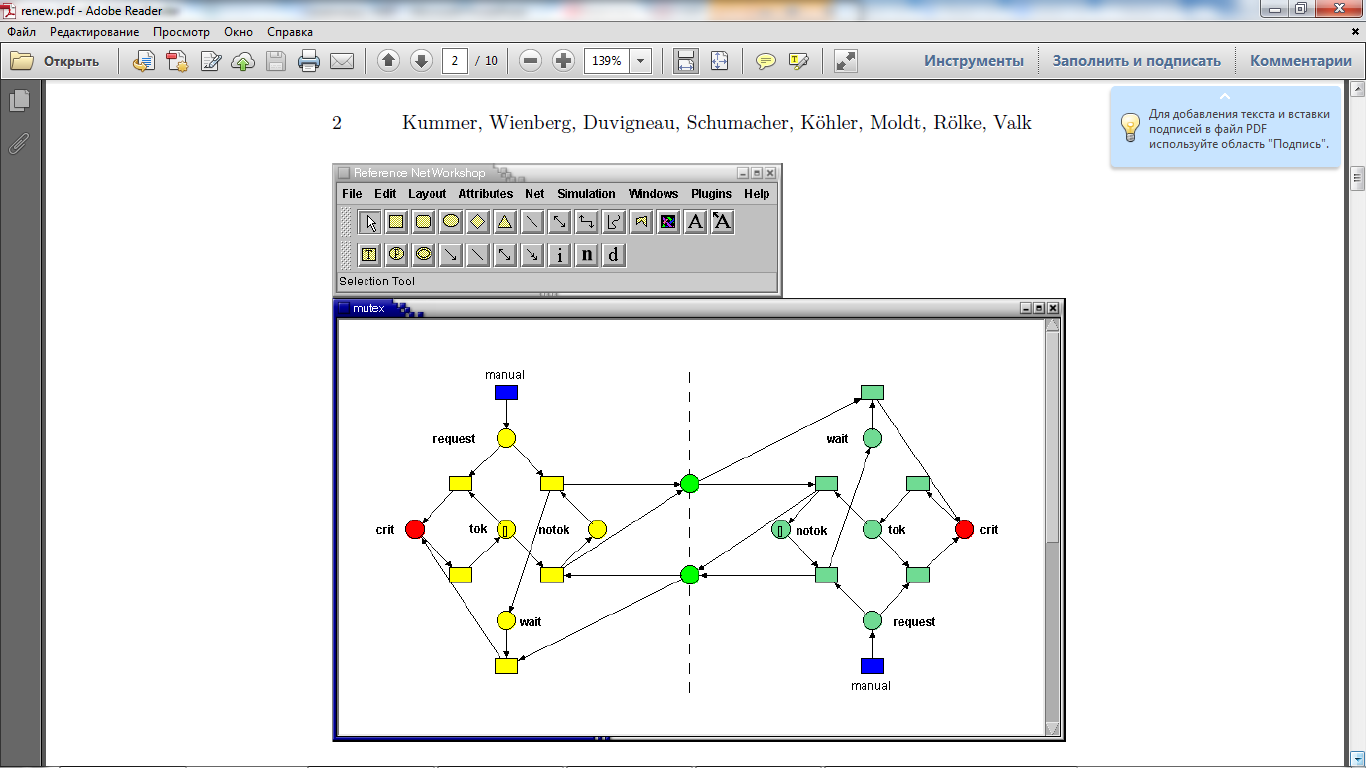


Рисунок 8. Симулятор Renew [7]

Моделирование в системе имеет несколько возможностей. По умолчанию имитация происходит автоматически, ее можно остановить на любом шаге, а также отладить работу модели. Более того, Renew поддерживать возможность ручного запуска выбранных переходов. При выборе такой возможности имитация происходит автоматически до тех пор, пока переходы, выбранные для ручного запуска, не станут потенциально активными. После того как пользователь запустит переход, имитация продолжится автоматически.

Симулятор Renew может предоставлять возможность построения сетей Петри различных видов: обыкновенные, временные, стохастический, раскрашенные и др.

Однако система не лишена недостатков. Одним из недостатков является отсутствие методов и функций анализа, встроенных в симулятор, что является достаточно важным, если с системой работают пользователи, не знающие в полной мере теории сетей Петри. Также использование языка Java при построении моделей ограничивает возможности пользователей, которые не знакомы с этим языком достаточно хорошо.

Существуют симуляторы сетей Петри, включающие все возможности данного симулятора, однако имеют более ясный и понятный интерфейс для конечного пользователя. Примером такого симулятора может быть Yasper [13].

## Выводы

После проведения обзора симуляторов сетей Петри можно заключить, что рассмотренные системы имеют множество достоинств, но также не лишены недостатков. Сравнительная таблица симуляторов приведена в табл. 1. Также в таблице представлено сравнение симуляторов не только друг с другом, но и с разработанной в TriadNS системой проектирования и моделирования сетей Петри.

Таблица 1. Сравнительная таблица симуляторов сетей Петри

| ***Критерии сравнения*** | ***Alpha/Sim*** | ***JSarp*** | ***QPNet*** | ***Renew*** | ***TriadNS*** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *Удобство построения* | + | + | + | + | + |
| *Удобство представления* | + | + | + | + | + |
| *Визуализация процесса моделирования* | + | + | + | + | + |
| *Ручной запуск переходов* | - | + | - | + | + |
| *Наглядное отображение результатов анализа* | + | + | - | - | + |
| *Использование различных видов сетей Петри* | + | - | + | + | + |
| *Бесплатное распространение* | - | + | + | + | + |
| *Дополнительные возможности* | Кроссплатформенность Пользовательские функции | Кроссплатформенность | Кроссплатформенность | Кроссплатформенность  Возможность использования Java | Возможность задать любое поведение |

Каждый из симуляторов является кроссплатформенным, что является немаловажным и позволяет запускать систему на многих операционных системах. Все рассмотренные симуляторы имеют дружественный и понятный интерфейс и ясное представление сетей Петри в графическом редакторе, визуализация в процессе имитации показывает каждое состояние сети Петри. При этом некоторые симуляторы (JSarp, Renew) предоставляет возможность запуска переходов вручную.

Достаточно важным фактором сравнения симуляторов сетей Петри является наглядное отображение результатов анализа, однако некоторые системы не предоставляют таких инструментов (QPNet, Renew).

Достоинством системы Alpha/Sim по сравнению с другими системами является возможность задания пользовательских функций для анализа модели, однако при этом система не бесплатна. JSarp, по сравнению с другими системами, обладает минимальным набором средств для построения сетей Петри и всеми необходимыми инструментами для анализа, но не поддерживает работу с различными видами сетей Петри, хотя реализация такой возможности имеется в планах разработчиков. Renew обладает наиболее мощными средствами для построения сетей Петри, которые предоставляют возможность использования языка Java.

Преимуществом использования системы TriadNS можно назвать то, что элементы сети могут иметь любое поведение, что позволяет использовать различные виды сетей Петри в исследовании. Также система может производить трансформацию из одной графической модели в другую.

# Сети Петри и их использование для моделирования компьютерных сетей

## Сети Петри

Сети Петри применяются исключительно при моделировании и являются инструментом исследования систем. Теория сетей Петри делает возможным моделирование системы математическим представлением ее в виде сети Петри [].

Возможно несколько подходов к использованию сетей Петри при проектировании систем. В одном из подходов сети Петри рассматриваются как вспомогательный инструмент анализа. Здесь для построения системы используются общепринятые методы проектирования. Затем построенная система моделируются сетью Петри, и модель анализируется. При этом трудности, встречающиеся при анализе, указывают на изъяны в проекте. Для их исправления необходимо модифицировать проект, который затем снова моделируется и анализируется. Цикл повторяется до тех пор, пока проводимый анализ не приведет к успеху.

Другой подход предполагает проведение проектирования системы в терминах сетей Петри. Здесь задача заключается в преобразовании представления сети Петри в реальную систему.

Таким образом, в первом случае необходима разработка методов моделирования систем сетями Петри, а во втором случае должны быть разработаны методы реализации сетей Петри системами. В обоих случаях необходимы методы анализа сетей Петри для определения свойств модели.

Теоретико-множественное определение структуры сети Петри можно представить в виде: , где – конечное множество позиций, – конечное множество переходов. Множество позиций и множество переходов не пересекаются, . является входной функцией – отображением из переходов в комплекты позиций. есть выходная функция – отображение из переходов в комплекты позиций.

Для иллюстрации понятий теории сетей Петри гораздо удобнее использовать графическое представление сетей Петри.

Граф G сети Петри есть двудольный ориентированный мультиграф, , где – множество вершин, а – комплект направленных дуг, , где . Множество V может быть разбито на два непересекающихся подмножеств P и T, таких, что , и для любой направленной дуги , если , тогда либо , либо .

Структура сети Петри представляет собой совокупность позиций и переходов. Вершина-позиция обозначается кружком, вершина-переход обозначается вертикальной чертой. Ориентированные дуги соединяют позиции и переходы.

Маркировка – это присвоение фишек позициям сети Петри, которые используются для определения выполнения сети Петри.

Маркировка μ сети Петри есть функция, отображающая множество позиций P в множество неотрицательных чисел N.

Маркировка может быть определена как вектор .

Маркированная сеть Петри есть совокупность структуры сети Петри и маркировки и может быть записана в виде . На графе сети Петри фишки изображаются в виде точки внутри кружка, который представляет собой позицию сети Петри.

Выполнением сети Петри управляют количество и распределение фишек в сети. Фишки находятся в кружках и управляют выполнением переходов сети. Сеть Петри выполняется посредством запусков переходов. Переход запускается удалением фишек из его входных позиций и образованием новых фишек, помещаемых в его выходные позиции.

Переход может запускаться только в том случае, когда он разрешен. Переход называется разрешенным, если каждая из его входных позиций имеет число фишек по крайней мере равное числу дуг из позиции в переход. Кратные фишки необходимы для кратных входных дуг. Фишки во входной позиции, которые разрешают переход, называются его разрешающими фишками.

Переход запускается удалением всех разрешающих фишек из его входных позиций и последующим помещением в каждую из его выходных позиций по одной фишке для каждой дуги.

Состояние сети Петри определяется ее маркировкой.

## Использование сетей Петри для моделирования

Сети Петри – мощный математический инструмент, предназначенный для моделирования распределенных и параллельных систем. С их помощью могут быть промоделированы многие системы, в особенности системы с независимыми компонентами, например, программное и аппаратное обеспечение ЭВМ, физические системы и др. Сети Петри применяются для моделирования возникновения различных событий в системе. В частности, они могут моделировать поток информации или другие ресурсы системы [18].

В настоящей работе рассматривается исследование компьютерных сетей с помощью сетей Петри.

Простое представление системы с помощью сетей Петри основано на событиях, возникающих в системе, и условиях. В этом случае события представляются в виде переходов, а позиции – в виде условий. При этом входы перехода являются предусловиями, а выходы – постусловиями. Возникновение события запускает переход, а выполнение условия отмечается возникновением фишки в позиции. Запуск перехода удаляет разрешающие фишки, представляющие выполнение предусловий, и создает новые фишки, представляющие выполнение постусловий.

Важной особенностью сетей Петри и систем, которые можно представлять в виде этой модели, является их параллелизм. Параллелизм заключается в том, что два разрешенных невзаимодействующих события могут происходить независимо друг от друга. Таким образом, сети Петри являются удобной моделью для систем, в которых несколько процессов могут выполняться одновременно.

Выполнение сети Петри рассматривается как последовательность дискретных событий. Появление конкретного события является одним из возможных, что приводит к недетерминированности, поэтому с помощью сетей Петри удобно моделировать системы, в которых события происходят асинхронно и независимо друг от друга. В частности такую ситуацию можно наблюдать при исследовании компьютерных сетей.

Анализ сетей Петри помогает получить информацию о структуре и динамическом поведении моделируемой системы, что может быть полезно при оценке системы и выработке предложений по ее усовершенствованию и изменению [17].

1. Свойства сетей Петри

Возможность моделирования системы с помощью сетей Петри является малополезным без знаний о том, как анализировать полученную модель. Анализ сетей Петри приводит к анализу поведения моделируемой системы и сводится к выполнению некоторых свойств сетей Петри.

Одно из важнейших свойств сети Петри, которая должна моделировать реальное устройство – это безопасность. Позиция сети Петри является безопасной, если число фишек в ней никогда не превышает 1. Сеть Петри называется безопасной, если все позиции сети являются безопасными. При исследовании компьютерных сетей с помощью сетей Петри свойство безопасности может свидетельствовать о возникновении каких-либо событий в исследуемой системе (буфер пуст, сообщение отправлено и т.д.).

Безопасность – это частный случай свойства ограниченности сетей Петри. Безопасность позволяет реализовать позицию триггером, ограниченность – счетчиком. Позиция является k-ограниченной, если количество фишек в ней никогда не превышает числа k. Соответственно, сеть Петри ограничена, если все ее позиции ограничены.

Ограниченность и безопасность характеризуют емкость условий. Так, можно ограничить емкость накопителей. Примером выполнения этого свойства может являться объем буфера, количество сообщений и т.д. в зависимости от исследуемой системы. Возможность неограниченного роста числа меток свидетельствует об опасности неограниченного роста длин очередей (например, переполнение памяти).

Сети Петри можно использовать для моделирования систем распределения ресурсов. В этом случае для сетей Петри важным свойством является сохранение. Сеть Петри является сохраняющей, если число маркеров в ней остается неизменным.

Одна из задач, которая может возникнуть при исследовании различных систем, - это возникновение тупиковых ситуаций. Тупик в сети Петри – это переход, который не может быть запущен. Таким образом, переход называется активным, или живым, если он не является заблокированным. Если какой-либо переход в процессе имитации ни разу не срабатывает, то для исследуемой системы это может свидетельствовать о том, что данная часть системы лишняя или неправильно функционирует.

Также можно выделить следующее понятие; переход называется потенциально живым, если существует такая разметка сети Петри, что данный переход может потенциально сработать.

Чтобы контролировать работу исследуемой системы либо возникновение каких-либо событий, сеть Петри должна удовлетворять свойству достижимости. Достижимость сети Петри заключается в следующем: может ли быть достигнуто определенное состояние сети Петри в процессе ее выполнения. Такая задача может решаться, например, при исследовании пути передачи сообщений между узлами компьютерной сети. Свойство достижимости является наиболее важным, так как все перечисленные выше свойства могут быть сведены к задаче достижимости.

1. Методы анализа сетей Петри

В теории сетей Петри существует несколько методов решения задач анализа модели: дерево достижимости и использование матричных уравнений. Данные методы достаточно просто реализовать программным способом, что является важным при реализации автоматического анализа СП [18], более того, существуют готовые алгоритмы для реализации этих методов.

В данной работе будет рассмотрен только метод построения дерева достижимости, так как этот метод позволяет проверить все рассмотренные выше свойства сетей Петри, тогда как матричные уравнения позволяют проверить свойства сохранения, достижимости. Хотя матричные уравнения достаточно перспективный метод, однако он имеет некоторые трудности [18].

Дерево достижимости представляет множество состояний сетей Петри, т.е. все возможные запуски переходов. Для того чтобы составить дерево достижимости необходимо пронумеровать каждую позицию. Каждая его вершина представляется в следующем виде , где – количество маркеров в позиции с номером, соответствующим номеру индекса.



Корнем дерева представляется состояние модели перед ее выполнением. Если система из состояния переходит в состояние после срабатывания перехода , то называется порождающей маркировкой, а – порожденной. В дереве достижимости вершина, соответствующая состоянию , является родительской для вершины, соответствующей состоянию , а дуга, соединяющая их, подписывается именем перехода , который привел к порожденной маркировке.



Рассмотрим следующий пример: пусть задана сеть Петри (рис. 1). Тогда деревом достижимости для такого примера служит дерево, построенное на рис. 2 после третьего шага выполнения.

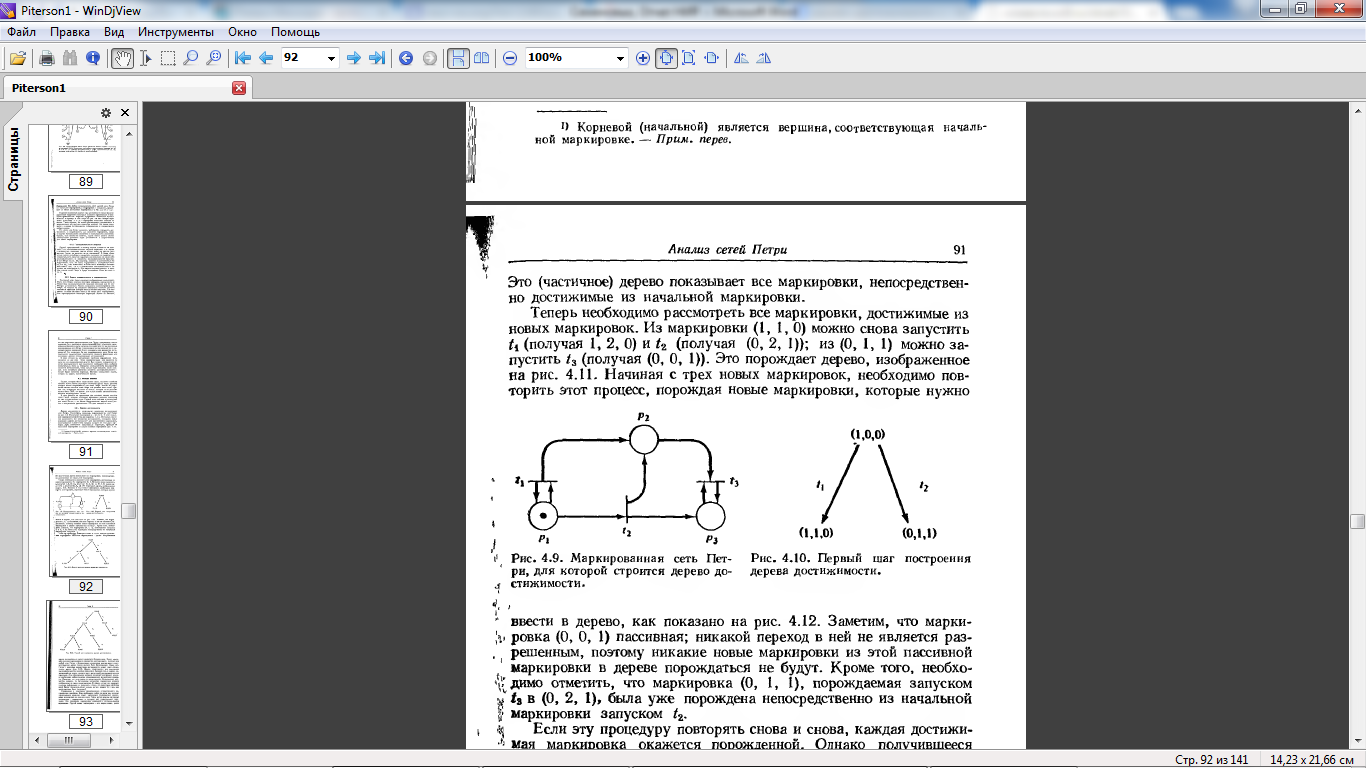


Рисунок 3. Пример сети Петри [18]

В данной сети вершины-позиции имеют такие имена, что удобно их нумеровать, поэтому в дереве достижимости не возникает сомнений, какие вершины сколькими метками обладают.

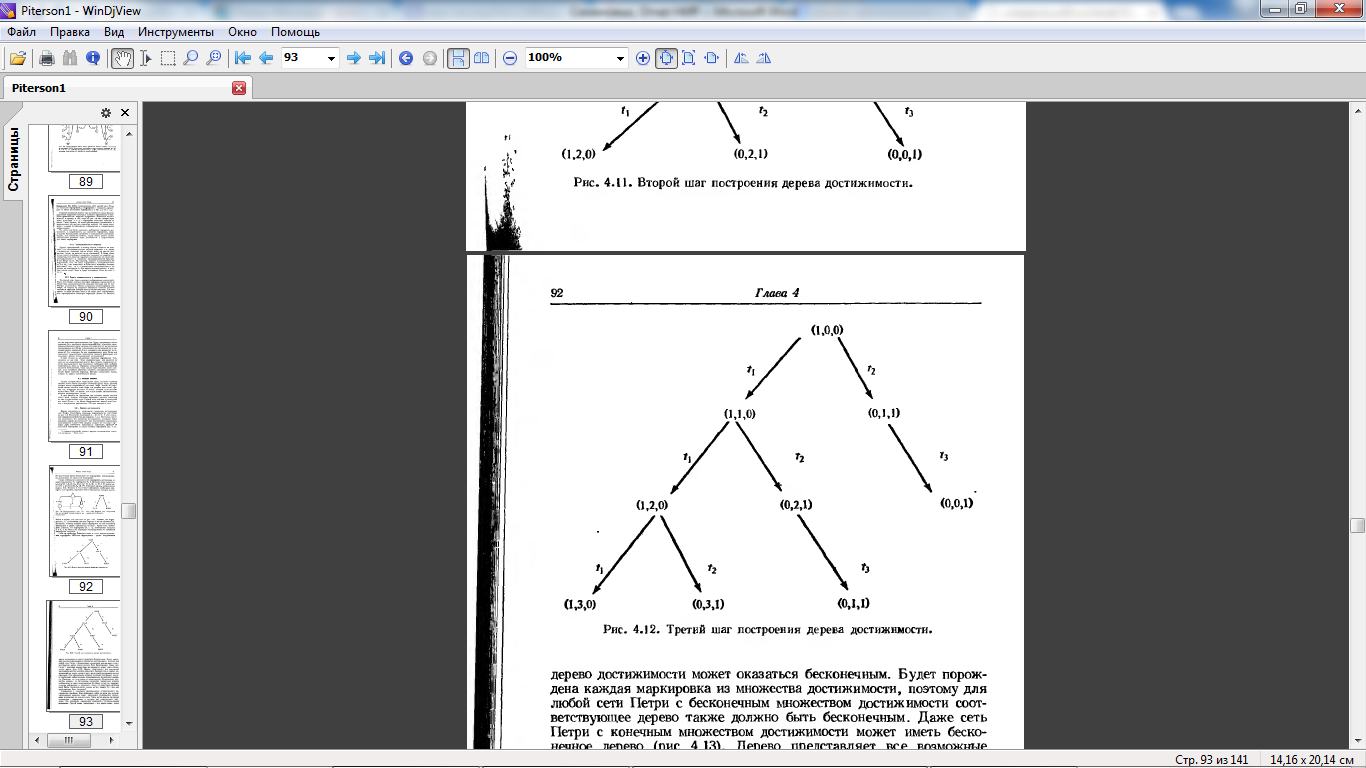


Рисунок 4. Дерево достижимости для примера [18]

Дерево достижимости может оказаться бесконечным. Даже в результате ограниченных сетей Петри может быть построено бесконечное дерево. Для решения такой задачи существуют несколько способов, а также представлен алгоритм в [18].

В [18] также доказано, что все свойства сетей Петри могут быть проверены с помощью построения дерева достижимости, поэтому построение дерева достижимости является не только наглядным методом анализа, но и эффективным.

## Представление компьютерной сети в виде сети Петри

Сети Петри были разработаны и используются в основном для моделирования. С их помощью возможно моделировать достаточно сложные вычислительные системы, аппаратное и программное обеспечение ЭВМ и др.

В данной работе с помощью сетей Петри моделируются компьютерные сети, при этом преобразование компьютерной сети в сеть Петри может быть выполнено несколькими способами в зависимости от детализации функций, выполняемых каждым элементом компьютерной сети.

В простейшем случае каждый элемент компьютерной сети можно представить в виде вершины-позиции сети Петри, а за взаимодействие между элементами компьютерной сети будут отвечать вершины-переходы. Так, например, элемент рабочая станция компьютерной сети можно представить в виде сети Петри следующей структуры:

Рабочая станция

Отправка запроса

. . .

. . .

Рисунок 9. Рабочая станция в виде сети Петри

Если же рассматривать элементы компьютерной сети и функции, которые они обеспечивают, более подробно, то для преобразования компьютерной сети в сеть Петри необходимо использовать определенный алгоритм. В [14] предложена методика перехода от моделей описания последовательности (IDEF0, UML) к сетям Петри. В данном случае сначала строится модель IDEF0, переход от которой ведет к диаграмме последовательностей UML, далее диаграмма последовательностей разбивается на отдельные фрагменты, которые в дальнейшем будет объединены в часть сетей Петри. Полученные части сети Петри соединяются между собой, образуя искомую модель.

Также возможно преобразование диаграммы активностей UML в сеть Петри с помощью различных алгоритмов [9]. При преобразовании процессов в сеть Петри позициями могут быть не только действующие объекты, но и условия, при выполнении которых происходит выполнение некоторых функций. Функции, которые выполняют объекты, преобразуются в переходы. Таким образом, статические элементы исходной модели преобразуются в позиции, а динамические элементы – в переходы.

В статье [12] представлен другой подход к преобразованию модели компьютерной сети в сеть Петри. Сначала определяются основные ролевые функционалы, представленные в виде простых сетей Петри, которые в дальнейшем с помощью операций с сетями Петри преобразуются в необходимые объекты компьютерной сети. Основными ролевыми функционалами в этом случае являются приемник/передатчик трафика, независимый генератор трафика и зависимый генератор трафика. Основные операции, которые выполняются с сетью Петри, - это отождествление позиций, добавление дуги, исключение дуги, переименование позиций, объединение СП, расщепление СП.

Рассмотрим подробнее структуры основных ролевых функционалов.

1. Приемник/передатчик трафика представляет элементарную сеть Петри, на основе которой строятся все остальные функционалы. Он состоит из двух позиций и одного перехода. Трафик поступает в позицию 1 и через переход попадает в позицию 2. С наличием перехода связана задержка в обслуживании. Трафик представляется в виде метки.

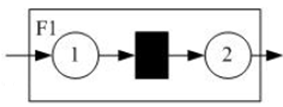


Рисунок 10. Функционал - приемник/передатчик трафика

1. Генератор трафика (независимый вариант): момент поступления новых меток в позицию 2 зависит от временной задержки. При входе в позицию 1 метки после срабатывания перехода в позиции 2 появится метка, а в позиции 1 также появится метка, таким образом генерируются новые сообщения.

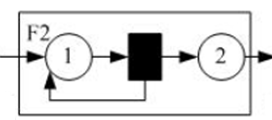


Рисунок 11. Функционал - независимый генератор трафика

1. Генератор трафика (зависимый вариант): генерация нового трафика зависит от некоторого дополнительного условия, т.е. момент поступления новых меток в позицию 2 зависит от временной задержки перехода и от наличия в позиции 3 метки.

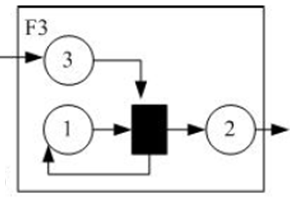


Рисунок 12. Функционал - зависимый генератор трафика

Так, например, рабочая станция с одним сетевым интерфейсом может быть представлена следующим образом (рис. 21). Сетевой узел принимает сообщения-запросы, обрабатывает их и отправляет в сеть сообщения-ответы. Подсеть позиция 1, переход 1, переход 2 представляют приемник трафика, который отвечает за прием сообщений; подсеть позиция 3, позиция 4, переход 2, позиция 5 – зависимый генератор трафика, который отвечает за обработку и отправку сообщений в сеть.

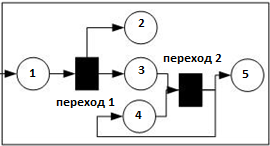


Рисунок 13. Рабочая станция

Маршрутизатор же принимает сообщения, анализирует и, при передаче из одной среды передачи в другую, преобразует сообщение, передает его на один, несколько или все порты (рис. 22). В данном случае позиции 1-4 вместе с переходами моделируют переход трафика в сеть с иной средой передачи.

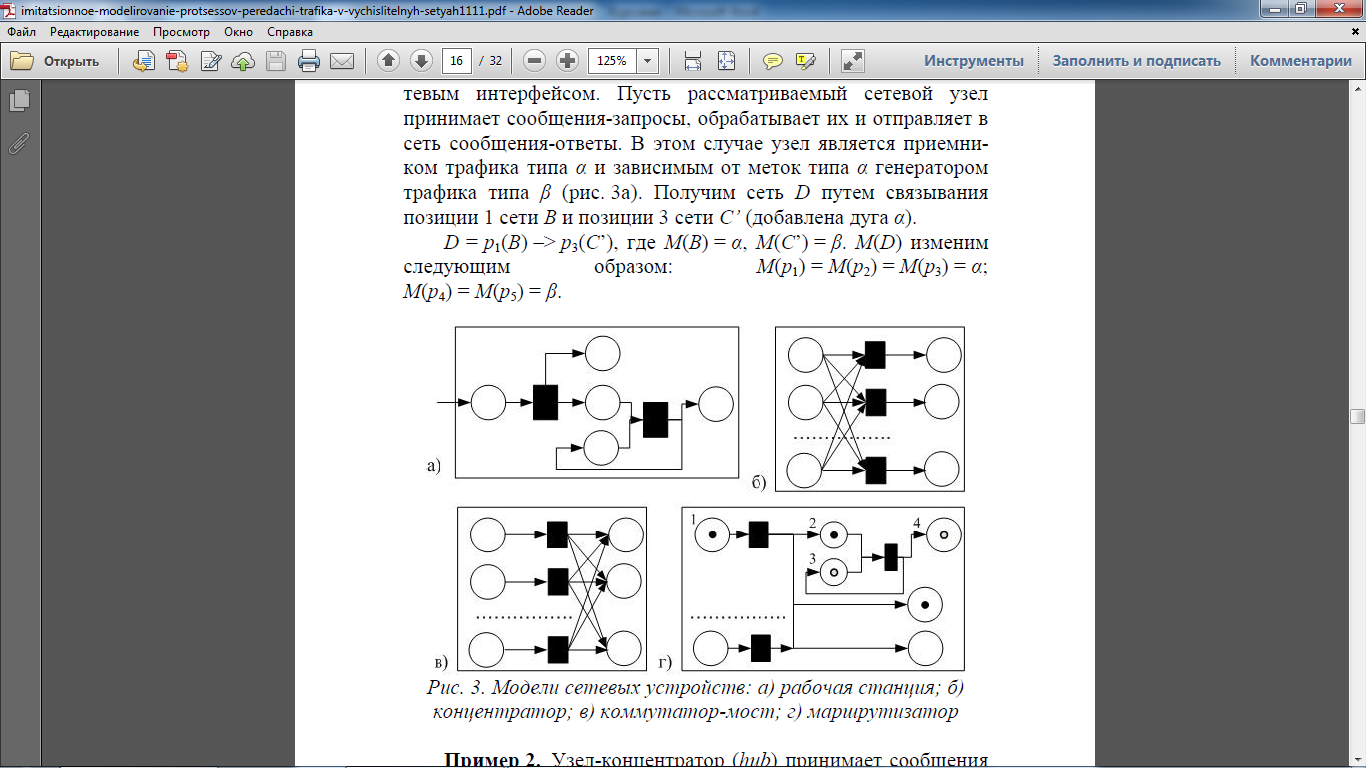


Рисунок 14. Маршрутизатор

Существуют и другие алгоритмы преобразования некоторых процессов в нотации сетей Петри, используя различные алгоритмы и математические средства [15].

## Используемые правила

Как было сказано ранее, перевод из одной модели в другую может быть произведен различными способами, в зависимости от целей решаемой задачи. Более того, можно переводить не только статическую структуру графа, но и трансформировать поведение. В данном случае, так как для имитационного эксперимента важно поведение каждого элемента модели, то необходимо трансформировать и поведение.

Наиболее простым преобразованием модели компьютерной сети в сеть Петри является трансформация структуры, то есть преобразование одного графа в другой. Правила трансформации описаны в Таблица 2.

Таблица 2. Трансформация структуры модели

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\user\Documents\GitHub\Tmp\ComputerTab\TriadNS\bin\Debug\img\comp.png | C:\Users\user\Documents\GitHub\Tmp\ComputerTab\TriadNS\bin\Debug\img\node.png |
| C:\Users\user\Documents\GitHub\Tmp\ComputerTab\TriadNS\bin\Debug\img\server.png | C:\Users\user\Documents\GitHub\Tmp\ComputerTab\TriadNS\bin\Debug\img\node.png |
| C:\Users\user\Documents\GitHub\Tmp\ComputerTab\TriadNS\bin\Debug\img\router.png | C:\Users\user\Documents\GitHub\Tmp\ComputerTab\TriadNS\bin\Debug\img\node.png |
|  |  |
|  |  |

Чтобы перевести поведение сущности модели компьютерной сети, необходимо трансформировать алгоритм ее поведения. Любой алгоритм, формализованный на некотором языке (процедурный язык), можно представить в виде блок-схемы, а правила перевода блок-схемы в сеть Петри указаны в [Питерсон] и представлены на Рисунок 1.

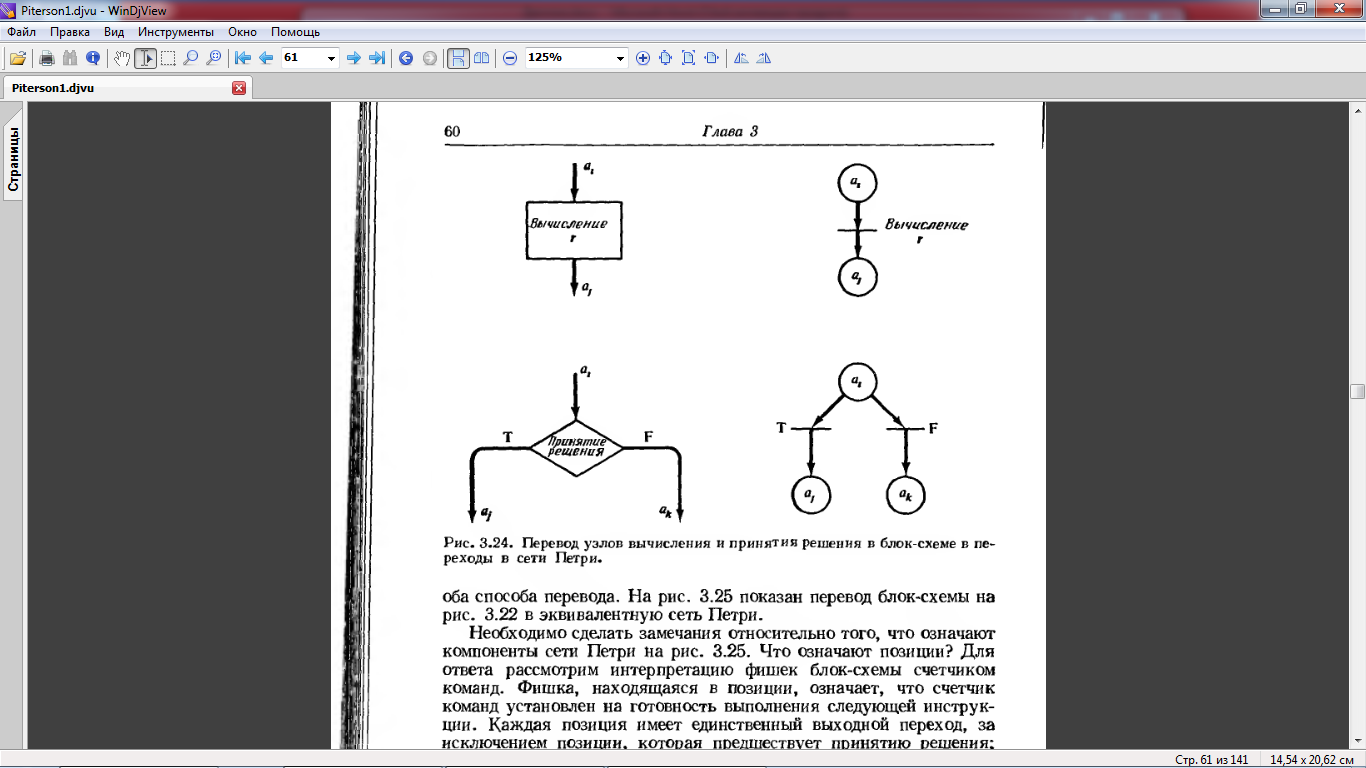


Рисунок 15. Перевод узлов вычисления и принятия решения в блок-схеме в сеть Петри

Рутины приведены в Приложение B, блок-схемы в Приложение C. Для демонстрации данного примера была построена блок-схема для рутины «Клиента» и «Сервера» на языке Triad. (+ привести полученную сеть Петри)

Однако такая трансформация моделей в большинстве случаев является избыточной, так как изменение отдельных переменных, описанных в блоке initial рутины и отвечающих за состояние сущности, чаще всего не влияет на общее поведение системы. Из-за этого представление в виде сети Петри становится запутанным, неинформативным.

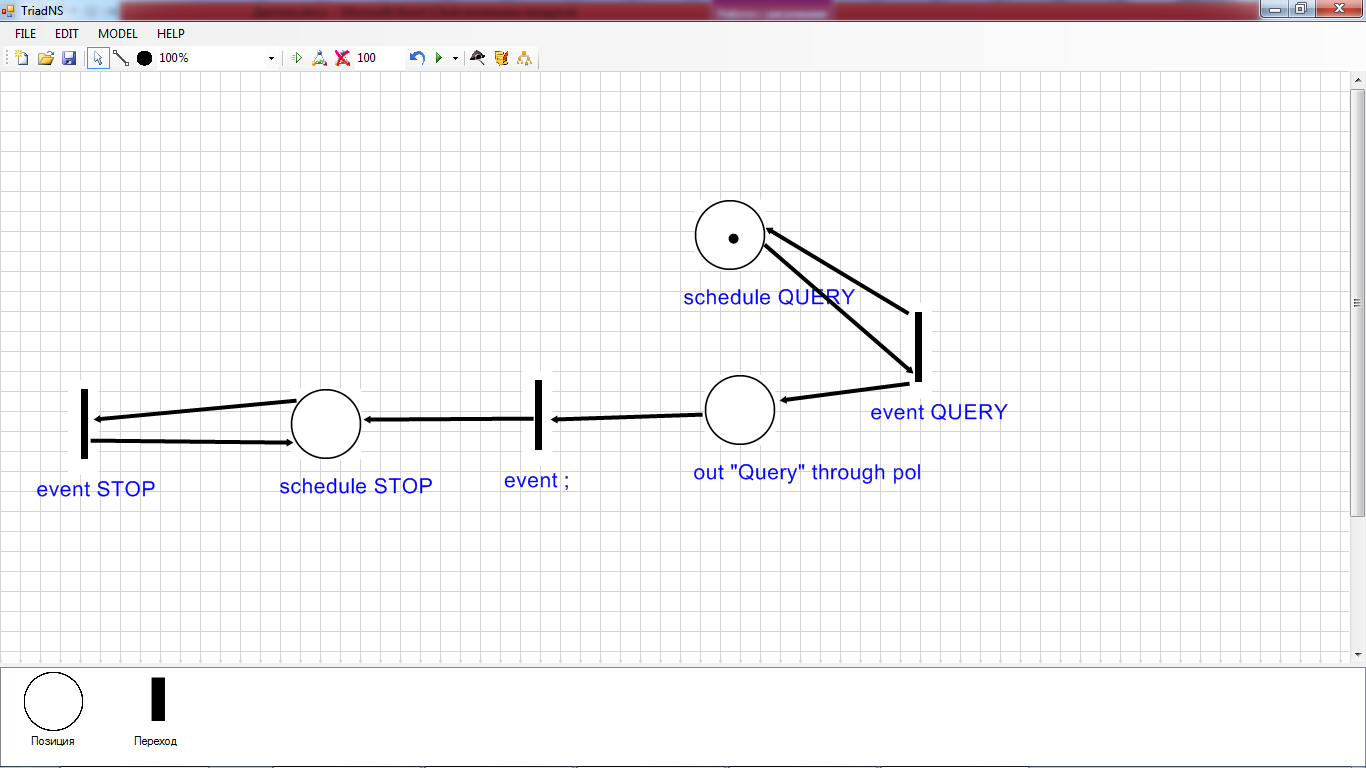
Важным является отображение событий, происходящих в системе, а также условий их возникновения. Исходя из формулировки соответствия элементов сети Петри условиям и событиям: события моделируются переходами, а условия – позициями, - рутина, основанная на концепции элементарных понятий активности и событий, легко моделируется с помощью сетей Петри.

События, происходящие в рутине, указаны явно. Условиями их возникновения являются либо отправка сообщения (out), либо отправка времени возникновения события в календарь событий (schedule). Исходя из данных рассуждений, необходимо определить события, происходящие в системе, а также условия их возникновения. Для этого возьмем граф состояний системы.

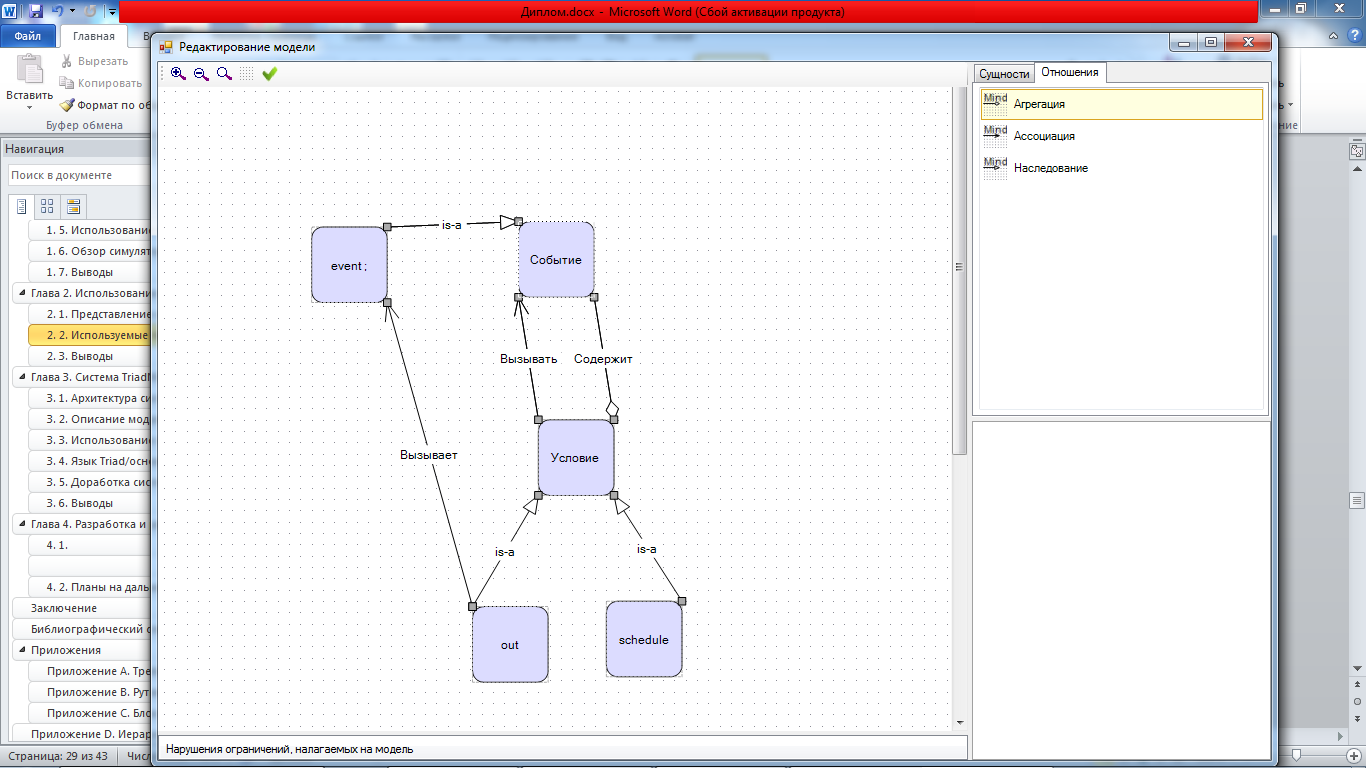
schedule STOP

out “Query” through pol

schedule QUERY



Метамодель рутины:



Правила трансформации:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  | C:\Users\user\Documents\GitHub\Tmp\ComputerTab\TriadNS\bin\Debug\img\node.png |
|  |  |
|  |  |

Также нужно учесть, что в блоке initial может быть вызов события. В этом случае данный вызов определяет начальную маркировку полученной сети Петри.

## Выводы

# Система TriadNS

Система TriadNS разрабатывается с использованием средств системы имитационного моделирования Triad.Net. Система Triad.Net является развитием системы автоматизированного проектирования Triad, которая была разработана на кафедре математического обеспечения вычислительных систем Пермского государственного университета и предназначалась для проектирования встроенных вычислительных систем.

## Архитектура системы

СИМ Triad.Net включает следующие компоненты [Миков А.И. и др., 2010]: компилятор, ядро, графический редактор, подсистему от­ладки, подсистему валидации, подсистему синхронизации распределен­ных объектов модели, подсистему балансировки (распределенная версия), подсистему орга­низации удаленного доступа, подсистему защиты от внешних и внут­ренних угроз, подсистему автоматического доопределения модели. Назначение каждого из компонентов представлено ниже: TriadCompile (компилятор языка Triad, переводит описание имитацион­ной модели с языка Triad во внутреннее представление); TriadDebugger (отладчик, использует механизм информационных процедур алгоритма исследования, локализует ошибки и вырабатывает рекомендации для их устранения на основании правил из базы данных, для каждого класса ошибок осуществляется поиск по онтологии соответствующего обработчика ошибок); TriadCore (ядро сис­темы, включает библиотеки классов основных элементов модели), TriadEditor (редактор моделей, предназначен для работы с моделью как в удаленном, так и локальном режимах, локальный режим предполагает работу с системой в том случае, если нет удаленного доступа), TriadBalance (подсистема балансировки), TriadSecurity (подсистема безопасно­сти, этот компонент используют при удаленном доступе к системе моделрования), TriadBuilder (подсистема автоматического доопределения частично описанной модели), база данных, где хранятся экземпляры элементов модели, TriadMining-набор процедур для исследования результатов модели методами DataMining, TriadRule – алгоритм синхронизации объектов распределенной модели, использующей для вычислительного эксперимента ресурсы нескольких вычислительных узлов.

## Описание модели

Triad.Net – событийно ориентированная система имитационного моделирования. Основным способом моделирования в системе является описание модели с помощью специального языка Triad. Основная его особенность - это разделение модели на слои.

Описание имитационной модели в Triad состоит из трех слоёв: слоя структур (STR), слоя рутин (ROUT) и слоя сообщений (MES). Таким образом, модель в системе Triad можно определить как M={STR,ROUT,MES} [4].

Слой структур представляет собой совокупность объектов, взаимодействующих друг с другом посредством посылки сообщений. Каждый объект имеет полюса (входные Pin  и выходные Pout), которые служат соответственно для приёма и передачи сообщений. Слой структур можно представить графом , где V– множество вершин, W – множество дуг (ребер), U – множество полюсов. Связи устанавливаются между полюсами различных вершин. В каждой вершине выделяются два подмножества – входных полюсов *In(v)* и выходных полюсов *Out(v)*. На входные полюса могут поступать сообщения, с выходных передаваться. Некоторые полюса могут быть одновременно входными и выходными. Дуги графа это пары полюсов типа , при этом .

Объекты действуют по определённому алгоритму поведения, который описывают с помощью рутины. Рутина представляет собой множество событий , планирующих друг друга. Выполнение события сопровождается изменением состояния  объекта. Состояние объекта определяется значениями переменных  рутины (, Var – множество переменных рутины). Таким образом, рутину можно представить как [4] , Здесь T – множество моментов времени (линейно упорядоченное абстрактное множество с отношением порядка ≤),  - конечное множество событий, - конечное множество состояний рутины, определяемых значениями переменных рутины . Естественно, множество значений переменных ограничено.  – начальное состояние рутины, InitE – отношение, определяющее начальное состояние рутины:  определяет для каждого события  момент его первоначального наступления. Ch – отношение изменение состояний, является отображением . Это отображение указывает, в какое состояние переходит рутина в результате наступления события. Sch – отображение , это отображение, каждой четвёрке  ставит в соответствие момент времени t’, что означает, что в результате срабатывания события е в момент времени t при состоянии руины q, событие е’ будет запланировано на момент времени t’. Рутины, как и вершины структуры, имеют входные In(R) и выходные Out(R) полюса. Во множестве событий рутины выделено входное событие ein. Все входные полюса рутины обрабатываются входным событием. Обработка выходных полюсов осуществляется остальными событиями рутины. Для передачи сообщения служит специальный оператор out (***out*** *<cообщение****> through*** *<имя полюса>).* Совокупность рутин определяет слой рутин ROUT.

Слой сообщений (MES) предназначен для описания сообщений сложной структуры.

Описание модели может проходить поэтапно, начиная с описания структуры. Все слои описывать не обязательно. Для каждого слоя есть свой круг задач, формулируемых и решаемых в случае его задания.

## Использование онтологий

В СИМ Triad.Net онтологии используются для доопределения частично описанной модели [Mikov A. et al,2007] , а именно, для доопределения поведения некоторого устройства, например, маршрутизатора в компьютерной сети. Это бывает необходимо на начальных этапах моделирования, когда исследователю или проектировщику необходимо получить оценки моделируемого объекта или системы, даже если они являются достаточно грубыми. При этом поиск компонента модели (экземпляра рутины) в базе данных осуществляется с помощью онтологий автоматически.

Для оперативного построения имитационной модели в конкретной предметной области используют графический интерфейс[Замятина Е.Б. и др., 2011], добавление нового компонента модели (экземпляра рутины) и настройка на конкретную предметную область выполняется с помощью онтологий.

Онтологии используются и в моделировании, в частности на различных этапах имитационного моделирования, начиная с этапа сбора информации и заканчивая этапом валидации модели.

Для настройки на конкретную предметную область в системе используются онтологии. В Triad разработана базовая онтология, которая является мета-метамоделью для построения метамоделей. Ее основу составляют следующие классы:

* TriadEntity – любая логическая сущность языка Triad, имеющая имя. Подклассами TriadEntity являются все классы базовой онтологии;
* Model – имитационная модель;
* ModelElement - составная часть имитационной модели, а также все, чем может быть специализирована вершина структуры имитационной модели.

Подклассами ModelElement являются классы:

1. Structure – структура имитационной модели.
2. Routine – рутина.

Основными свойствами в базовой онтологии являются следующие:

1. Свойства владения чем-либо: модель имеет структуру, структура имеет вершину, вершина имеет полюс и т.д.
2. Свойства принадлежности к че0му-либо – inverse properties по отношению к соответствующим свойствам владения – структура принадлежит модели, вершина принадлежит структуре, полюс принадлежит вершине и т.д.
3. Свойства, связывающие полюс с присоединенной к нему дугой: connectsWithArc (Pole, Arc), connectsWithPole (Arc, Pole).
4. putsOn (Routine, Node) – свойство, связывающее вершину с наложенной на нее рутиной.
5. modelingToCondition (Model, ModelingCondition) – свойство, связывающее модель с условием моделирования.

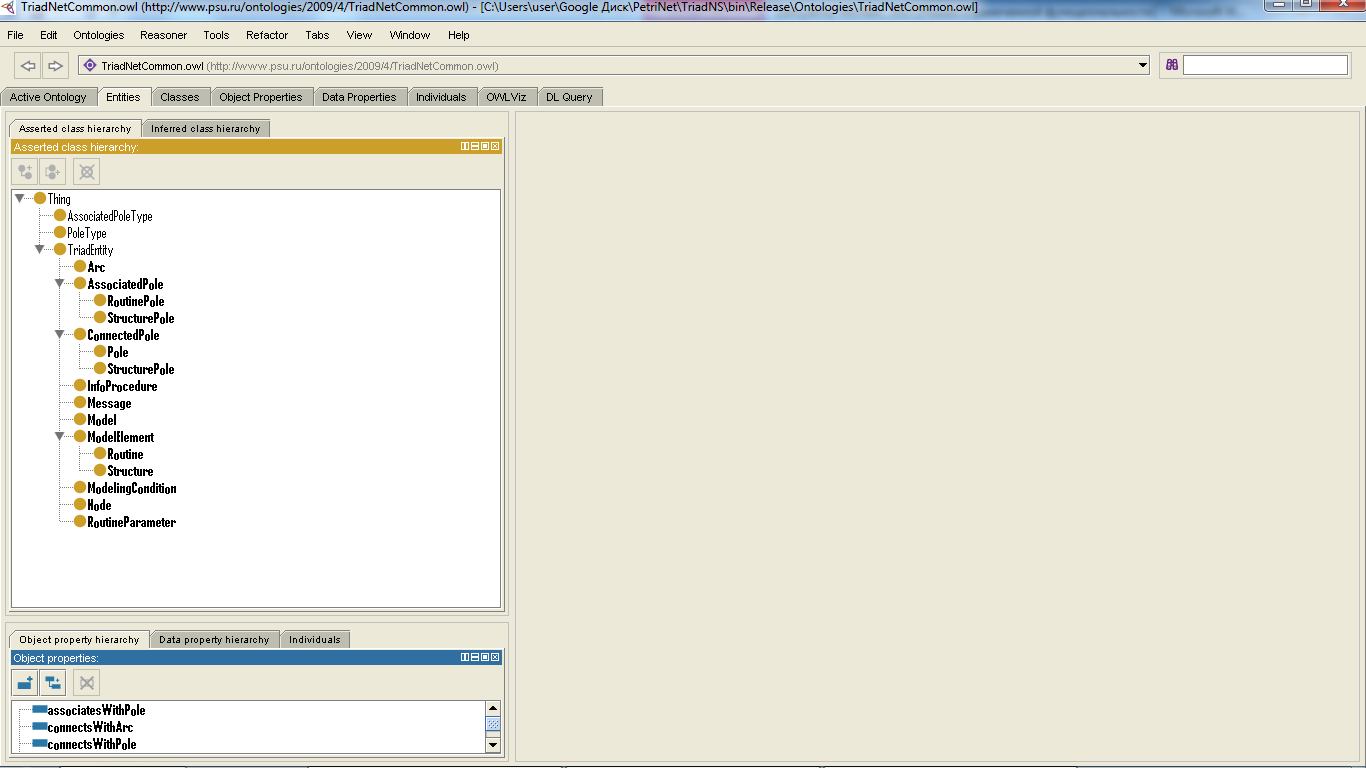


Рисунок 16. Иерархия классов базовой онтологии

Онтология системы TriadNS дополняет базовую онтологию. В зависимости от того, какая предметная область проектируется, используются различные онтологии. Для проектирования компьютерных сетей используется онтология, в которой введены специализированные подклассы основных классов базовой онтологии. Также были добавлены некоторые свойства.

Для построения в системе TriadNS сетей Петри была разработана онтология данной предметной области. К базовой онтологии были добавлены соответствующие подклассы. Загружая данную онтологию, пользователь может строить сети Петри, задавать стандартное поведение для элементов полученной модели и моделировать ее поведение. Имитационная модель представляется графически. Для работы с онтологиями в языке C# используется библиотека OWL API.

В системе имитационного моделирования Triad.Net онтологии также используются для автоматического доопределения частично описанных моделей, так как для проведения моделирования необходимо, чтобы поведение каждой вершины было определено. Все возможные рутины элементов описываются в онтологии. Стандартные рутины имеют параметры, которые пользователь может изменять до запуска моделирования. Стандартным поведением вершин сети Петри выступают вершины-позиции с одной входной и/или одной выходной дугами и вершины-переходы с одной входной и одной выходной дугами.

Для каждого элемента сети можно определить произвольное количество рутин, описав их на языке Triad и добавив в онтологию. При добавлении рутины следует указать необходимость соединения каждого полюса рутины и семантический тип возможной смежной вершины, значения по умолчанию для указанных в рутине параметров. Так, например, для сетей Петри вершины могут быть соединены дугой, если они имеют различный тип, т.е. вершина-позиция может быть соединена только с вершиной-переходом.

Так как онтологии компьютерной сети и сетей Петри являются метамоделями, то для трансформации одной модели в другую необходимо задать определенные правила.

## Язык Triad/основные особенности системы

## Доработка системы

## Выводы

# Разработка и реализация системы

В предыдущих главах были рассмотрены теоретические аспекты, необходимые для исследования компьютерных сетей с помощью других моделей, а именно с помощью сетей Петри. Для возможности анализа компьютерных сетей с помощью сетей Петри была спроектирована и разработана подсистема на основе TriadNS, в которой можно строить сети Петри и моделировать их поведение.

## Реализация графического редактора для работы с сетями Петри

В результате работы был спроектирован и реализован модуль для работы с сетями Петри в системе TriadNS, в который входит графический редактор и средства анализа сетей Петри, основанный на методе построения дерева достижимости.

Диаграммы UML, построенные в ходе проектирования модуля приведены в приложении.

Для того, чтобы система настраивалась на новую модель, необходимо построить онтологию предметной области, которая является для нее метамоделью и представляется в виде онтологии.

Перед тем как создавать систему построения сетей Петри с помощью графического редактора, уже существующего в системе, необходимо построить онтологию предметной области. Используя базовую онтологию в качестве метамодели и добавив соответствующие подклассы, была построена онтология сетей Петри с помощью инструментальных средств Protégé 4.0.2.

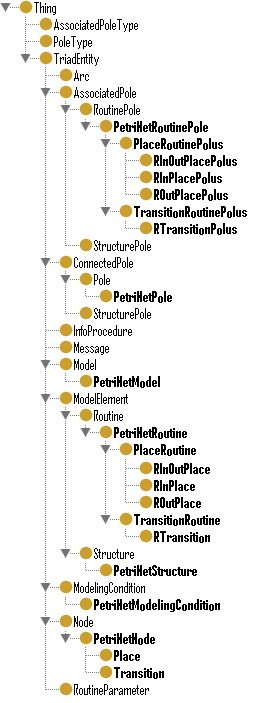


Рисунок 24. Иерархия классов онтологии сетей Петри

Эта онтология встроена в онтологию TriadNS для возможности работы пользователя с системой, моделируя исследуемый несколькими моделями. Полная иерархия классов онтологии TriadNS приведена в Приложение D.

После того как онтология предметной области была построена в графический редактор системы TriadNS были добавлены соответствующие элементы, а в программу – классы. В системе были созданы инструменты для построения сетей Петри: пиктограммы вершин сети Петри, элементы управления для добавления дуг и меток. Также система поддерживает построение сетей Петри с кратными дугами и кратными метками.

1. Основные элементы системы

Элементы сети: вершины и позиции – загружаются из онтологии. Все подклассы класса PetriNetNode, который содержит два подкласса: «Позиция» и «Переход». Они отображаются в виде пиктограмм на панели, из которых пользователь может их перетащить на рабочую область в нужное место.

После перемещения элементов на рабочую область они имеют определенный семантический тип, но поведение вершин изначально не определено. Поведение этих элементов можно задать автоматически либо вручную. В качестве стандартного поведения вершин выступает следующие варианты: вершины с одной входной и/или одной выходной дугами (для позиций) и вершины с одной входной и одной выходной дугами (для перехода), которые можно выбрать в контекстном меню при выборе рутин. Туда попадают все экземпляры рутин данного семантического типа. Каждая из рутин имеет некоторое количество параметров, которые пользователь может изменять после наложения рутины на элемент. Если у некоторых элементов поведение не задано, то перед началом моделирования система предложит доопределить их поведение автоматически.

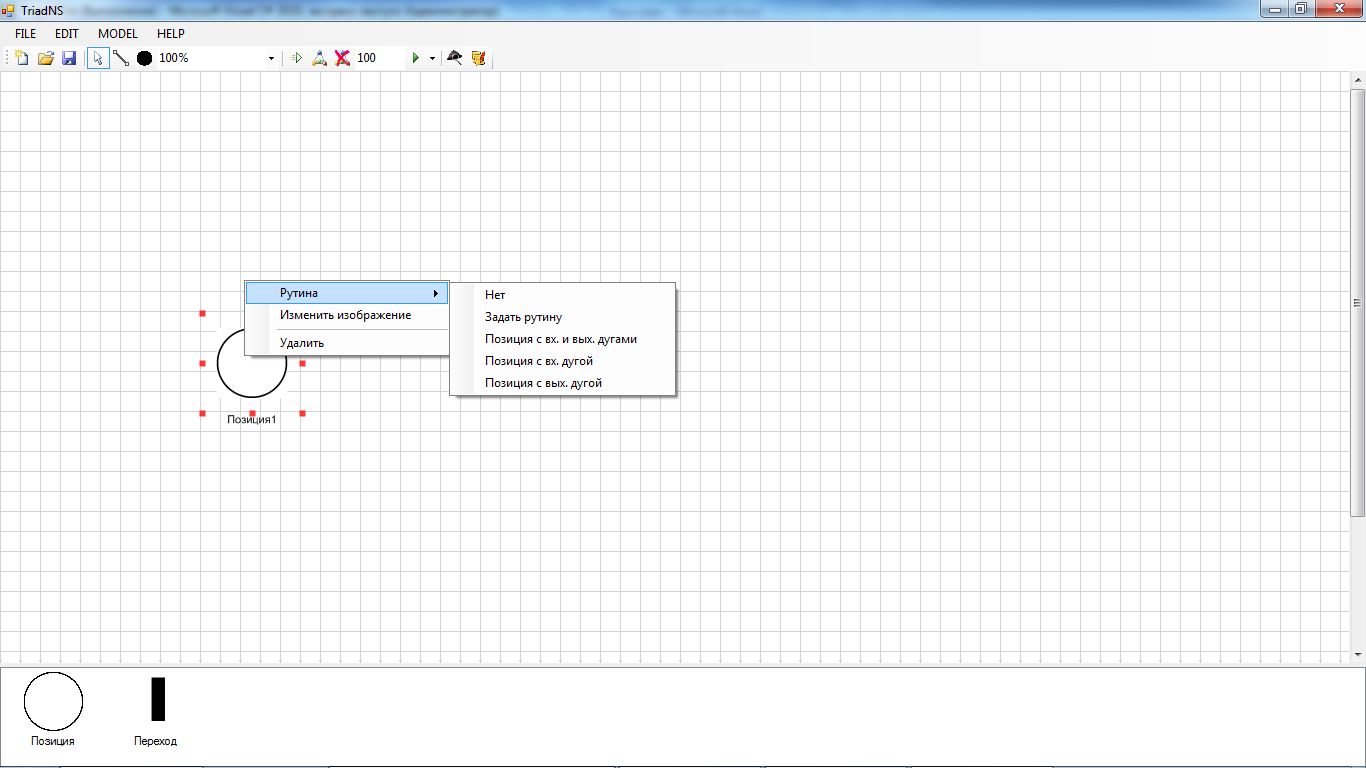


Рисунок 25. Определение поведения вершин

Далее необходимо для каждой дуги и вершины определить полюса, через которые вершины будут обмениваться сообщениями, также в диалоговом окне можно определить кратность дуги. Пользователь может задавать кратность дуг и простым перетаскиванием дуги.

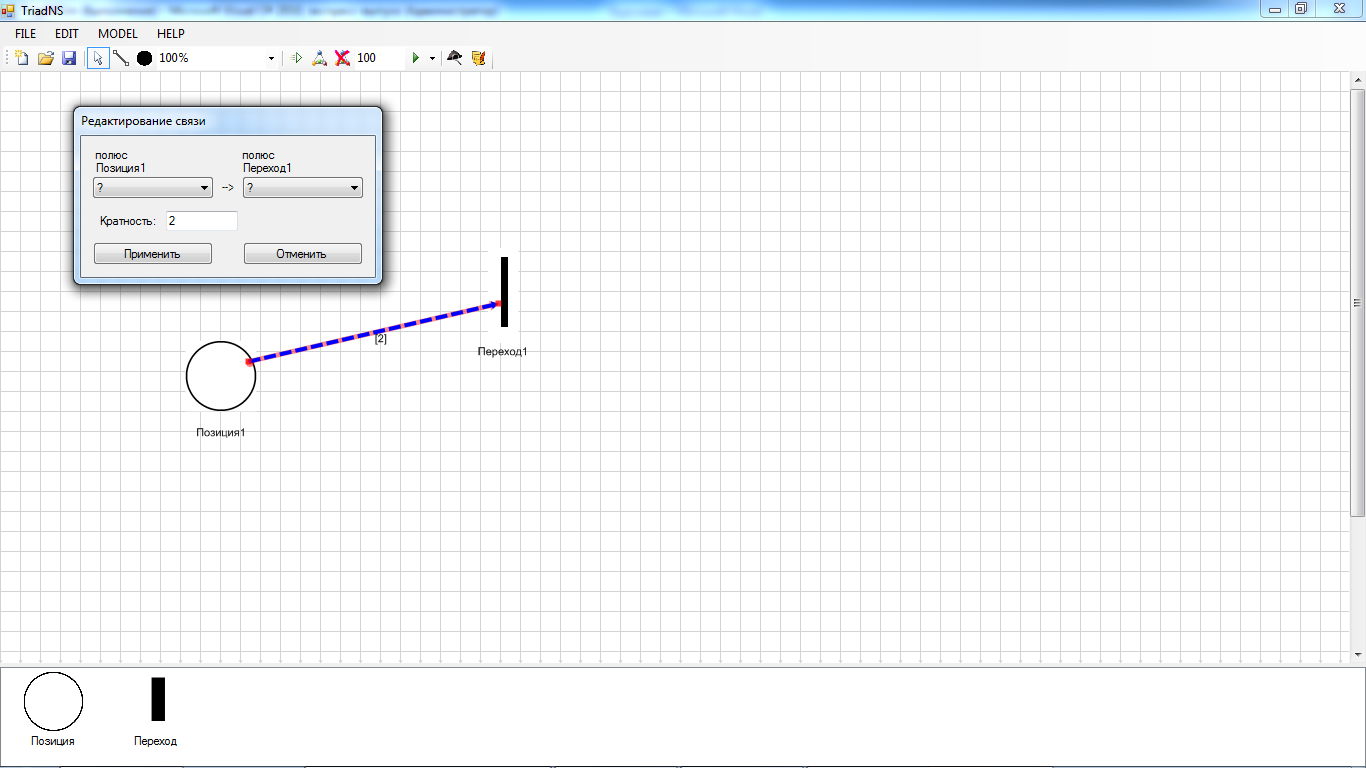


Рисунок 26. Редактирование связи

Для каждой вершины, в зависимости от количества соединенных с ней дуг, должны существовать разные рутины. Для удобства пользователя был разработан шаблон для задания рутины, который будет определять стандартное поведение вершины. Шаблон загружается в текстовый редактор для создания рутин в зависимости от того, сколько фишек имеет вершина и сколько дуг с ней соединено. Таким образом, пользователю не нужно с нуля описывать поведение вершины, а только принять рутину, описанную шаблоном. Шаблоны для вершин представлены в приложении.

Для того чтобы пользователю не нужно было задавать количество маркеров для каждой вершины перед процессом имитации, их число автоматически синхронизируется с параметром InitialNumMarks, который есть в рутине каждой вершины. Таким образом, пользователь либо задает количество маркеров в диалоговом окне изменения значений параметров, либо изменяет количество маркеров – графических элементов.

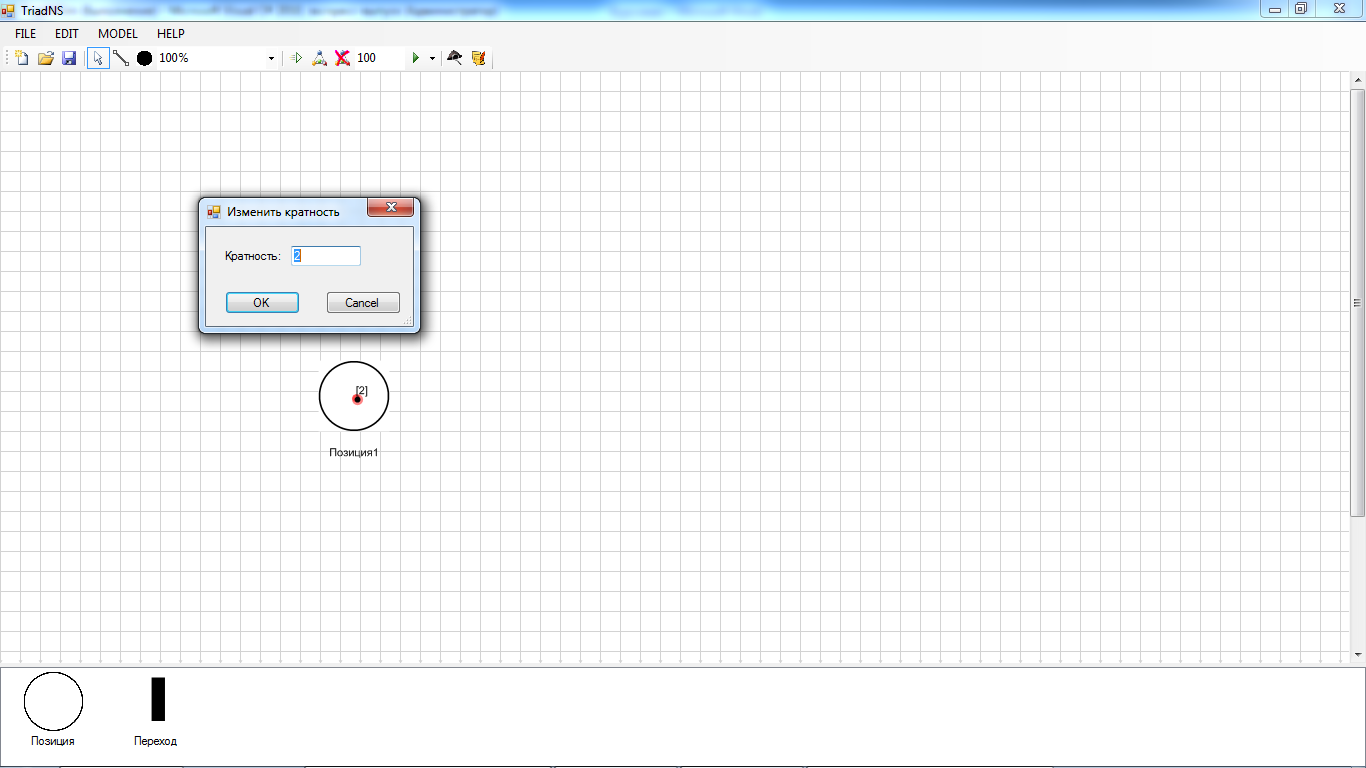


Рисунок 27. Изменение кратности маркеров

В процессе имитации работы сети Петри происходит ее визуализация. Состояние сети Петри перерисовывается, если изменяется количество маркеров у какой-либо вершины. После имитации в отдельном окне выводится отчет о выполнении с печатью тех сообщений, которые были отправлены при выполнении рутин.

1. Пример построения сети Петри на основе задачи о писателе и читателе

Для демонстрации работы системы была спроектирована сеть Петри, показывающая работу задачи «Писателей и читателей». При проектировании данной сети позициями являются статические объекты, используемые в задаче («Писатель», «Читатель», «Буфер»), и условия выполнения ими функций («Запись\_произведена», «Запись\_считана»). Переходами являются действия, выполняемые объектами: «Произвести\_запись», «Поместить\_в\_буфер», «Удалить\_из\_буфера», «Использовать\_запись». Поведение элементов же было автоматически определено.

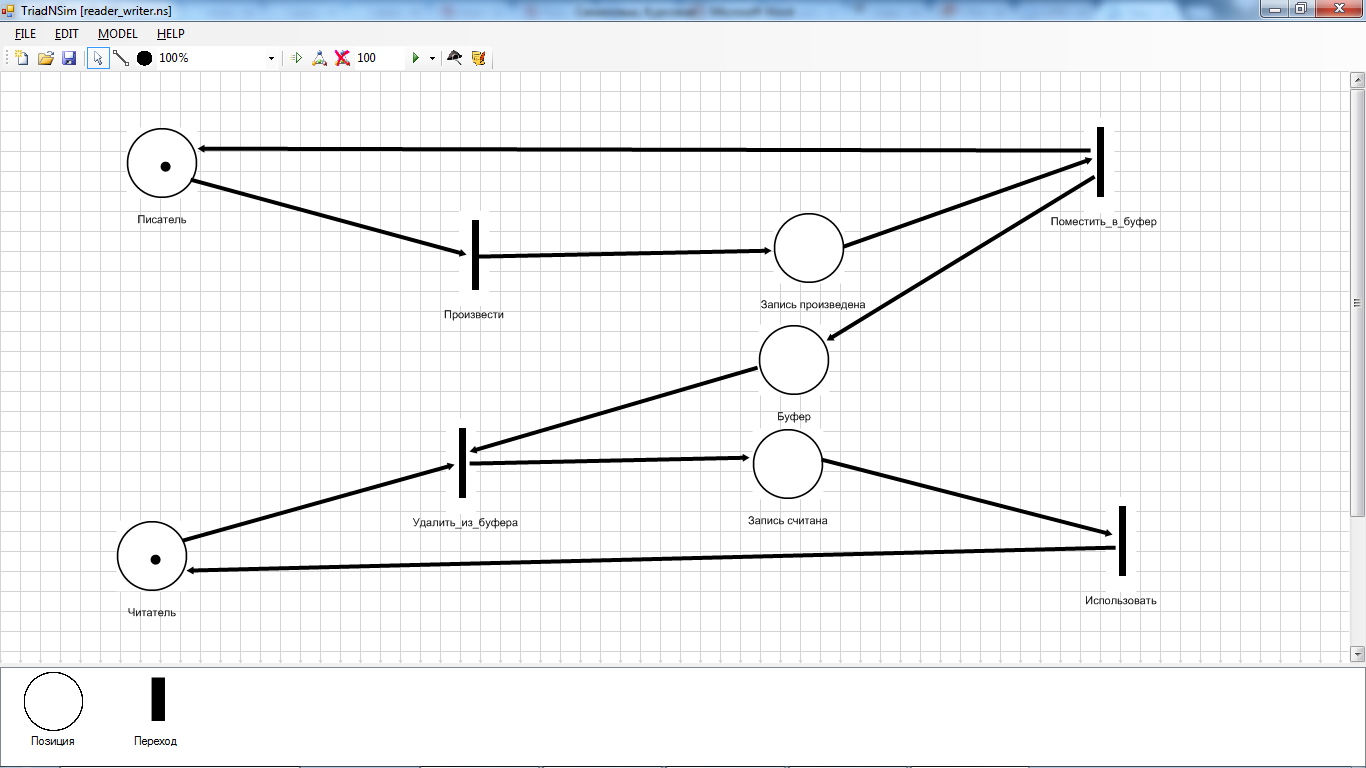


Рисунок 28. Сеть Петри задачи о писателе и читателе

## Реализация средств анализа сетей Петри

## Реализация трансформатора моделей

## Дополнительные доработки системы

Также был изменен интерфейс системы. Для работы с несколькими моделями и их быстрой навигации был реализован браузер моделей. В правой части экрана располагается окно графического редактора моделей с отдельными вкладками для каждой модели. В левой части – дерево, отображающее модели, с которыми работает пользователь в текущее время, а также их сущности.

При добавлении новой вкладки из онтологии TriadNS загружаются доступные модели, которые могут быть построены в системе.

Также была реализована возможность добавления так называемых динамических объектов в модель – это такие объекты, от расположения которых зависит состояние моделируемой системы, такие объекты перемещаются в процессе моделирование (например, метки, или маркеры, в сетях Петри, заявки в СМО). Была реализована возможность проведения визуализации модели в процессе моделирования. Именно изменение расположения таких динамических объектов отображается при моделировании.

Для того чтобы пользователь мог вручную моделировать поведение исследуемой системы, была реализована возможность ручного управления процессом имитации. С помощью такой функциональности, пользователь может прогонять события, происходящие при решении определенных задач.

## Планы на дальнейшую разработку

## Выводы

# Заключение

# Библиографический список

1. A. Sukhov, L. Lyadova. MetaLanguage: a Tool for Creating Visual  Domain-Specific Modeling Languages. pp. 42-53. DOI: 10.15514/SYRCOSE-2012-6-5
2. Миков А. И. Автоматизация синтеза микропроцессорных управляющих систем. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1987. – 288 с.
3. Cetinkaya D., Verbraeck A. Metamodeling and model transformations in modeling and simulation // Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, 2011, p. 3048-3058
4. Spiteri Staines A. A Triple Graph Grammar Mapping of UML 2 Activities into Petri Nets // International Journal of Computers Issue1, 2010, Vol.4, p. 27-35
5. Гудов А. М., Семехина М. В. Имитационное моделирование процессов передачи трафика в вычислительных сетях // Управление большими системами, вып.31. – с. 130-161
6. Дорофеев Р. С. Модели структурного описания для оценки их качества: Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук: 05.13.01 – Иркутск, 2014. – 16 c.
7. Замятина Е. Б., Михеев Р. А. Опыт разработки графического пользовательского интерфейса, настраиваемого на предметную область // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems, 2012. – 9 c.
8. Cetinkaya D. Model Driven Development of Simulation Model
9. Czarnecki Krzysztof, Helsen Simon. Classification of Model Transformation Approaches // OOPSLA’03 Workshop on Generative Techniques in the Context of Model-Driven Architecture, 2003, pp. 1-17
10. Лядова Л.Н. Метамоделирование как основа средств разработки профессионально-ориентированных информационных систем / Математика программных систем: межвуз. сб. науч. ст. Пермь: Изд-во Перм. гос. нац. исслед. ун-та, 2012. – Вып. 9. – С. 20-32.
11. Batarseh Ola, McGinnis Leon F. SYSTEM MODELING IN SYSML AND SYSTEM ANALYSIS IN ARENA // Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, 2011, pp. 2924-2935
12. Замятина Е. Б., Сухов А. О., Ходырева В. А. Опыт применения многомодельного подхода к моделированию бизнес-процессов // Технологии разработки информационных систем: сборник статей международной научно-практической конференции: Изд-во ЮФУ, Таганрог, 2015

# Приложения

## Требования, предъявляемые к разрабатываемой системе.

1. *Наименование системы*. Анализ и моделирование компьютерных сетей с использованием нотаций сетей Петри.
2. *Цели и назначение системы*. Система предназначена для реализации многомодельного подхода к имитационному моделированию компьютерных сетей. Для компьютерных сетей (далее КС) можно построить несколько математических моделей: сеть Петри, системы массового обслуживания и т.д. Система TriadNS позволяет описать КС в нотации сетей Петри и выполнить моделирование, используя теорию сетей Петри. Кроме того, систему можно использовать в учебных целях для демонстрации сетей Петри и их использования при изучении тупиковых ситуаций.

Моделирование системы с использованием математической теории сетей Петри позволит: повысить эффективность анализа компьютерных сетей, выявить «опасные» участки компьютерных сетей, в том числе тупиковые состояния.

1. *Требования к системе в целом*. Система должна представлять собой расширение системы проектирования компьютерных сетей TriadNS, построенной на базе системы имитационного моделирования Triad.Net .
2. *Источником данных для системы должны быть*. система проектирования и моделирования компьютерных сетей TriadNS, онтологии.
3. *Функциональные требования.* Система должна обеспечивать возможность выполнения перечисленных ниже функций:
4. Построение сетей Петри;
5. Имитационное моделирование сети Петри;
6. Редактирование сети Петри;
7. Визуализация модели;
8. Визуализация процесса моделирования;
9. Ручной запуск переходов в процессе моделирования;
10. Трансформация модели компьютерной сети в сеть Петри;
11. Автоматическая трансформация модели компьютерной сети в сеть Петри на основе заданных правил.
12. *Требования к надежности системы*. Уровень надежности достигается за счет программно-аппаратных средств, организации бесперебойного питания технических средств. При возникновении ошибок в работе системы должны выводиться сообщения о некорректной работе и причине ошибки.
13. *Требования к внешнему оформлению системы.* Должна быть выполнена реализация графического редактора для построения сети Петри с возможностью изменения и настройки графических элементов редактора, возможностью изменения масштаба построенной модели.

*Требования к интерфейсу пользователя.* интерфейс должен обеспечивать удобную работу конечного пользователя, знающего предметную область.

1. *Требования к программному обеспечению.* Система должна разрабатываться и эксплуатироваться на основе уже существующей системы проектирования компьютерных сетей TriadNS. Разработка проекта ведется с использованием языка программирования высокого уровня C#, в среде Visual Studio 2010, построение пользовательских дополнений к системе может быть выполнено на языке Triad. Имитационное моделирование полученной модели проводится с помощью системы имитационного моделирования Triad.Net. Основным языком взаимодействия пользователя и системы является русский или английский язык: взаимодействие пользователя с программой осуществляется на русском языке, все отчеты выводятся на русском языке, графический интерфейс с пользователем должен быть на русском или английском языке.
2. *Дополнительные требования.* Требования к масштабируемости: подсистема может расширяться в дальнейшем с помощью написания дополнительных программ/подпрограмм. Требования к переносимости: система должна переноситься на другие как продукт Microsoft. Требования к открытости: подсистема является программным продуктом с закрытым доступом к коду.

## Рутины сущностей модели компьютерной сети

Рутина сервера

routine SERVER [integer max; real T](input receive; output send)

initial

boolean busy;

integer length;

busy=false;

length=0;

endi

event;

if busy then

if length<max then

length=length+1;

endif

else

schedule STOP in T;

busy=true;

endif

ende

event STOP;

if length>0 then

length=length-1;

schedule STOP in T;

else

busy=false;

endif

ende

endrout

Рутина Клиента

routine Client [real T] (InOut pol)

initial

schedule QUERY in 0;

endi

event QUERY;

out “Query” through pol;

schedule QUERY in T;

ende

endrout

Рутина Рабочей станции

Рутина маршрутизатора

## Блок-схемы рутин



# Иерархия классов онтологии TriadNS

## Фрагменты онтологии предметной области «Система проектирования и моделирования компьютерных сетей TriadNS»

Цель: Описание используемых методов в системе имитационного моделирования TriadNS, модулей системы

