

Содержание

Введение	2
1 Аналитический раздел	4
1.1 Анализ решений	4
1.2 Обзор существующих решений	4
1.3 Анализ UML диаграмм	7
1.3.1 Диаграмма деятельности	9
1.3.2 Представление UML диаграмм	10
1.4 Сети Петри	11
1.4.1 Моделирующие способности сетей Петри	13
1.4.2 Раскрашенные сети Петри	15
1.5 Анализ сетей Петри	17
1.5.1 Дерево достижимости	18
1.5.2 Матричный способ	18
2 Конструкторский раздел	20
2.1 Этапы решения поставленной задачи	20
2.2 Построение диаграммы деятельности	22
2.2.1 Алгоритм Кофмана-Грагама	22
2.2.2 Энергетический алгоритм	22
2.3 Описание UML диаграмм с помощью ХМЛ	22
2.4 Преобразование диаграммы деятельности в раскрашенную сеть Петри	22
2.4.1 Получение списка переменных	23
2.4.2 Введение начальной разметки	24
2.4.3 Преобразование в простую сеть Петри	24
2.4.4 Наложение раскраски	26
2.5 Алгоритм построения дерева достижимости	26
Список использованных источников	28

Введение

Среди большого числа понятий, которые возникли и исследуются в информатике и кибернетике, одним из наиболее важных является понятие алгоритма. Алгоритм представляет процесс решения задачи как последовательное выполнение простых (или ранее определенных) шагов. Каждое действие, предусмотренное алгоритмом, исполняется только после того, как закончилось исполнение предыдущего. Понятие алгоритма тесно связано с понятием конечного автомата, для них свойственен одинаковый способ функционирования: система переходит из состояния в состояние в соответствии с заданной функцией переходов и осуществляет очередной (последовательный) шаг алгоритма.

По мере усложнения решаемых задач все большее внимание привлекают "неалгоритмические" параллельные системы с недетерминированным поведением, в которых отдельные компоненты функционируют, в основном, независимо, иногда взаимодействуя друг с другом. Примером могут служить такие системы параллельной обработки информации, как многопроцессорные вычислительные машины, параллельные программы, моедливающие параллельные дискретные системы и их функционирование, мультипрограммные операционные системы и т.п.

Системы с параллельно функционирующими и асинхронно взаимодействующими компонентами не описываются адекватно в терминах классической теории автоматов. Такие фундаментальные понятия, как состояние автомата и глобальная функция перехода не удобны для наглядной и экономичной характеристики недетерминированной динамики поведения систем с локальными связями между независимыми параллельными процессами.

Среди многих существующих методов описания и анализа дискретных параллельных систем выделился подход, который основан на использовании сетевых моделей, восходящий к сетям особого вида, предложенным Карлом Петри для моделирования асинхронных информационных потоков в системах преобразования данных.

Часто алгоритм функционирования сложных систем представляют в виде диаграммы деятельности UML, отличающейся от классической блок-схемы наличием элементов для представления многопоточной обработки. При этом в многопоточных системах встают вопросы о достижимости состояний и наличии блокировок. Для решения этих вопросов часто диаграмму деятельности представляют в виде простой сети Петри, при этом моделируется лишь процесс выполнения без привязки к данным. В отличие от простых сетей Петри, в раскрашенных сетях немаловажную роль играет типизация данных, основанная на понятии множества цветов, которое аналогично типу в декларативных языках программирования. Таким образом, представив диаграмму в виде раскрашенной сети Петри можно провести моделирование работы

с учетом типов входных данных, что максимально приблизит процесс моделирования к реальному функционированию процесса.

Целью работы является разработка метода анализа функционирования диаграммы деятельности UML, позволяющего выявить блокировки и недостижимые состояния.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать алгоритмы анализа диаграмм деятельности с целью применения их в работе;
- проанализировать и выбрать метод представления диаграмм;
- разработать метод преобразования диаграммы в раскрашенную сеть Петри;
- исследовать и выбор метода анализа сетей Петри;
- Экспериментально исследовать разработанный алгоритм.

1 Аналитический раздел

1.1 Анализ решений

Диаграмма деятельности — это, по существу, блок-схема, которая показывает, как поток управления переходит от одной деятельности к другой, при этом внимание фиксируется на результате деятельности. Результат может привести к изменению состояния системы или возвращению некоторого значения. Она отличается от традиционной блок-схемы более высоким уровнем абстракции, возможностью представления с помощью диаграмм деятельности управления параллельными потоками наряду с последовательным управлением.

Обычную блок-схему можно представить в виде конечного автомата, так как в любой момент времени из одной вершины поток выполнения переходит строго в одну другую. Теория автоматов имеет широкое распространение и для них реализовано множество методов, что делает задачу анализа весьма тривиальной задачей. Но с помощью автомата нельзя представить схемы с параллельными вычислениями, поэтому возникает необходимость использовать другой математический аппарат для исследования их поведения.

Таким аппаратом стали сети Петри, созданные специально для моделирования дискретных динамических систем. Сеть Петри представляет собой двудольный ориентированный граф, состоящий из вершин двух типов — позиций и переходов, соединённых между собой дугами. Вершины одного типа не могут быть соединены непосредственно. В позициях могут размещаться метки (маркеры), способные перемещаться по сети. Для анализа сетей Петри существует два метода: матричный метод и метод построения дерева достижимости. Оба метода имеют свои недостатки, но, применимо к данной проблематике лучшие результаты будет давать метод, основанный на деревьях достижимости.

1.2 Обзор существующих решений

Наиболее близким и точным аналогом диаграмм деятельности являются математически строгие дракон-схемы визуального алгоритмического языка ДРАКОН. Более отдалённым аналогом являются схемы алгоритмов по ГОСТ 19.701-90.

ДРАКОН (Дружелюбный Русский Алгоритмический язык, Который Обеспечивает Наглядность) — визуальный алгоритмический язык программирования. Был разработан в рамках космической программы «Буран». Основной задачей разработчиков было создание единого универсального языка программирования, который своей доступностью и мощностью был бы способен заменить специализированные языки ПРОЛ2 (для разработки бортовых комплексных программ Бурана), ДИПОЛЬ (для создания наземных программ Бурана) и ЛАКС (для моделирования). В качестве аксиоматики для ДРАКОНа были выбраны устремлённые графы (специальный класс

циклических орграфов). Такое двумерное структурное программирование годится для доказательного построения алгоритмов методом Дейкстры. В отличие от блок-схем, дракон-схемы имеют средства для описания работы в реальном времени.

Некоторые ученые считают, что существующие способы записи алгоритмов и программ (принятые во всем мире) слишком трудны для понимания и требуют неоправданно больших трудозатрат. Это обстоятельство ставит непреодолимый барьер для многих специалистов, работа которых связана с алгоритмами, но которые не имеют резерва времени, чтобы научиться выражать свои профессиональные знания в форме алгоритмов и программ. Язык ДРАКОН использует новую эргономичную нотацию (дракон-схемы) и за счет этого существенно облегчает алгоритмизацию и программирование. Благодаря использованию дракон-схем алгоритмы и программы становятся более понятными, доходчивыми, ясными, прозрачными.

ДРАКОН — графический (визуальный) язык, в котором используются два типа элементов:

- графические фигуры (икон);
- текстовые надписи, расположенные внутри или снаружи икон (текстоэлементы).

Поэтому язык ДРАКОН имеет не один, а два синтаксиса: графический и текстовый. Графический (визуальный) синтаксис охватывает алфавит икон, правила их размещения в поле чертежа и правила связи икон с помощью соединительных линий. Текстовый синтаксис задает алфавит символов, правила их комбинирования и привязку к иконам. (Привязка необходима потому, что внутри разных икон используются разные типы выражений). Императивная (процедурная) часть языка Дракон может описываться на основных языках программирования (с, с#, pascal и т.д.)

Система получается как результат процедурной декомпозиции деятельности на два и более алгопроцессов связанных отношением вызова и/или взаимодействия, т.е. решение сложной задачи мы разбиваем на подзадачи. В алгоритме решения при этом выделяем основной алгоритм и вспомогательные («вставки» в терминах языка ДРАКОН).

ДРАКОН поддерживает декомпозицию алгоритма выделением вспомогательных алгоритмов-вставок («предопределённых процессов» в терминах блок-схем по ГОСТ 19.701-90).

Представляемые схемами модели процессы могут находиться либо в отношении «главный-подчинённый» (иерархическая, или ранговая модель), либо в отношении «партнёров» (одноранговая, или диспозитивная модель). По порядку же возникновения всегда существует первичный процесс, который для другого данного процесса бывает:

— вызывающий — когда данный процесс был вставкой (во вставку во вставку и т. д. — если уровней вызова много) в другой процесс;

— «родительский» — когда данный процесс порождён как часть системы т. н. совместно протекающих взаимодействующих процессов (асинхронных или параллельных).

В ранговой модели существует только одна рабочая точка. Она последовательно проходит процессы, начиная с первичного вызывающего. Там, где указана вставка другого процесса, совершается переход на его схему. Когда эта схема пройдена до конца — переход обратно на место указания вставки. В совокупности эти переходы образуют т. н. переход с возвратом. Первичный процесс здесь понимается как головной.

Суть асинхронности (параллелизма) — в допущении более чем одной «рабочей точки» для системы процессов. Каждая точка развёртывает свою схему, и при необходимости процессы взаимодействуют. Первичный процесс в этом случае понимается как базовый; он может контролировать ход порождённых им процессов и при необходимости «снимать» их — досрочно прекращать исполнение.

Переход от текстового (табличного) представления к графовому и называется визуализацией. ДРАКОН визуализирует структуру маршрутов для любого текстового языка программирования — и вообще для представления формальных информационных моделей, программно или алгоритмически строгих. Второе подразумевает построение модели, допускающей интерпретацию по Тьюрингу/Посту, Черчу/Клини, Маркову. [1] Первое следует понимать в смысле структуризации программы по Т. Бадду и Н. Вирту.

Дракон-схема реализует представление маршрутов алгоритма в классе устремлённых циклических ориентированных графов с дополнительно наложенным ограничением планарности (укладки на плоскости без пересечений), как это было показано Ермаковым и Жигуненко.[2] Вершины дракон-схемы представляют операторы и псевдооператоры при условии заполнения их текстом.

По предложению Паронджанова [1], для укладки содержание схемы разделяется на части-ветки так, чтобы из каждой пары пересекающихся цепей одна оказывалась связью между ветками. А эти связи укладываются в особую структуру — петлю силуэта — где ветки разделяются соединителями. Тем самым в знаковом (человекочитаемом) представлении цепочки следования вершин и их группы (образующие как линейную, так и нелинейную структуру) упорядочены на диосцене и снабжены метками-именами веток. То и другое повышает удобство чтения.

ДРАКОН не относится к языкам «визуальным» в смысле, по-видимому, наиболее распространённом. Точнее будет называть его «графическим» (граф-языком) алгоритмизации (программирования). Термин был предложен А. А. Тюгашевым в

его работе [3] по программированию для систем реального времени. По-простому говоря, разницу можно показать следующим образом:

— «визуальный» язык — такой, что использует не чисто текстовое представление внешней формы предмета описания как основу для описания содержания предмета (определения его модели).

— «графический», граф-язык — такой, что представляет непосредственно содержание предмета описания, его модель, используя графику.

Так, ДРАКОН представляет свой предмет формализации — маршрутную структуру процесса (в частности, программной процедуры) непосредственно. И именно её «визуализирует» в виде графа. Тогда как «визуальный» язык типа Дельфи представляет экранные формы программы как результат её работы. И уже с ними связывает процедуры как предмет формализации программистом. Причём в общем случае существуют и процедуры, не работающие непосредственно с экранными формами, и содержание процедур представляется текстом.

Ввиду большой наглядности языка ДРАКОН он получил широкое распространение в расчетах космических и военноморских программах. Распространение языка ДРАКОН можно разделить на два этапа.

На первом этапе сфера применения ДРАКОНа была ограничена ракетно-космической техникой. Язык применялся и применяется в Пилюгинском центре при разработке программ для бортового компьютера «Бисер», установленного на борту ракет-носителей и разгонных блоков космических аппаратов.

На втором этапе возникла необходимость приспособить инструментальные средства языка ДРАКОН для гражданских нужд широкого применения, для эксплуатации на персональных компьютерах (в том числе ноутбуках).

В результате сфера применения языка стала постепенно расширяться. Началось использование дракон-схем за рамками ракетно-космической техники — для решения задач в различных предметных областях.

1.3 Анализ UML диаграмм

В последнее время наблюдается общее повышение интереса ко всем аспектам, связанным с разработкой сложных программных приложений. Для многих компаний корпоративное программное обеспечение и базы данных (БД) представляют стратегическую ценность. Существует высокая заинтересованность в разработке и верификации методов и подходов, позволяющих автоматизировать создание сложных программных информационных систем (ИС). Известно, что систематическое использование таких методов позволяет значительно улучшить качество, сократить стоимость и время поставки ИС.

Визуальные модели широко используются в существующих технологиях управления проектированием систем, сложность, масштабы и функциональность которых постоянно возрастают. В практике эксплуатации ИС постоянно приходится решать такие задачи как: физическое перераспределение вычислений и данных, обеспечение параллелизма вычислений, репликация БД, обеспечение безопасности доступа к ИС, оптимизация балансировки нагрузки ИС, устойчивость к сбоям и т.п.

Построение модели корпоративной ИС до ее программной разработки или до начала проведения архитектурной реконструкции столь же необходимо, как наличие проектных чертежей перед строительством большого здания. Хорошие модели ИС позволяют наладить плодотворное взаимодействие между заказчиками, пользователями и командой разработчиков. Визуальные модели обеспечивают ясность представления выбранных архитектурных решений и позволяют понять разрабатываемую систему во всей ее полноте. Сложность разрабатываемых систем продолжает увеличиваться, и поэтому возрастает актуальность использования «хороших» методов моделирования ИС. Язык моделирования, как правило, включает в себя:

- элементы модели — фундаментальные концепции моделирования и их семантику;
- нотацию — визуальное предоставление элементов моделирования;
- принципы использования — правила применения элементов в рамках построения тех или иных типов моделей ИС.

Технология визуального моделирования, позволяет работать со сложными и очень сложными системами и проектами. И не важно, преобладает ли в проекте техническая сложность (статическая) или динамическая сложность управления. Сложность программных систем возрастает по мере создания новых версий. И в какой-то момент наступает «эффект критической массы», когда дальнейшее развитие ИС становится невозможным, поскольку уже никто не представляет в целом "что и почему происходит". Происходит потеря управлением проектом. Внешней причиной или толчком возникновения этого неприятного эффекта может послужить, например, увольнение ведущего программиста или системного аналитика.

Сам по себе язык UML является языком графического описания для объектного моделирования в области разработки программного обеспечения, созданного консорциумом OMG (object managment group). UML является языком широкого профиля, это открытый стандарт, использующий графические обозначения для создания абстрактной модели системы, называемой UML-моделью. UML был создан для определения, визуализации, проектирования и документирования, в основном, программных систем. UML не является языком программирования, но в средствах выполнения UML-моделей как интерпретируемого кода возможна кодогенерация. Большинство редакторов UML диаграмм используют свои собственные нотации для

текстового описания полученных диаграмм, учитывающие особенности самой системы.

1.3.1 Диаграмма деятельности

При моделировании поведения проектируемой или анализируемой системы возникает необходимость не только представить процесс изменения ее состояний, но и детализировать особенности алгоритмической и логической реализации выполняемых системой операций.

Одно из основных направлений использования диаграмм деятельности — отображение внутрисистемной точки зрения на прецедент. Диаграммы деятельности применяют для описания шагов, которые должна предпринять система после того, как инициирован прецедент.

Для моделирования процесса выполнения операций в языке UML используются диаграммы деятельности. Применяемая в них графическая нотация во многом похожа на нотацию диаграммы состояний, поскольку на этих диаграммах также присутствуют обозначения состояний и переходов. Каждое состояние на диаграмме деятельности соответствует выполнению некоторой элементарной операции, а переход в следующее состояние выполняется только при завершении этой операции. Таким образом, диаграммы деятельности можно считать частным случаем диаграмм состояний. Они позволяют реализовать в языке UML особенности процедурного и синхронного управления, обусловленного завершением внутренних деятельностей и действий. Основным направлением использования диаграмм деятельности является визуализация особенностей реализации операций классов, когда необходимо представить алгоритмы их выполнения.

В контексте языка UML деятельность (activity) представляет собой совокупность отдельных вычислений, выполняемых автоматом, приводящих к некоторому результату или действию (action). На диаграмме деятельности отображается логика и последовательность переходов от одной деятельности к другой, а внимание аналитика фокусируется на результатах. Результат деятельности может привести к изменению состояния системы или возвращению некоторого значения.

Диаграмму деятельности можно представить как $AD = \{N, E\}$, где N — вершины, E — переходы. Переходами является отношение между двумя состояниями, показывающее, что объект, находящийся в первом состоянии, должен выполнить некоторые действия и перейти во второе состояние. Вершины представляют собой состояния и могут быть одного из типов:

- **Начальное и конечное состояние.**
- **Деятельность** — состояние, которое представляет вычисление атомарного действия, как правило — вызов операции. Состояния действия не могут быть

подвергнуты декомпозиции. Они атомарны, то есть внутри них могут происходить различные события, но выполняемая в состоянии действия работа не может быть прервана. И наконец, обычно предполагается, что длительность одного состояния действия занимает неощутимо малое время.

— **Условие** — описывает различные пути выполнения в зависимости от значения некоторого булевского выражения. Графически точка ветвления представляется ромбом. В точку ветвления может входить ровно один переход, а выходить — два или более. Для каждого исходящего перехода задается булевское выражение, которое вычисляется только один раз при входе в точку ветвления. Ни для каких двух исходящих переходов сторожевые условия не должны одновременно принимать значение «истина», иначе поток управления окажется неоднозначным. Но эти условия должны покрывать все возможные варианты, иначе поток остановится.

— **Разделение и слияние** — разделение потока выполнения на несколько параллельных процессов.

1.3.2 Представление UML диаграмм

Основным стандартом описания UML диаграмм является XMI (XML metadata interchange) — стандарт OMG для обмена метаданными с помощью языка XML. XMI может использоваться для любых метаданных, если их метамодель может быть выражена с помощью MOF (meta-object facility). С точки зрения OMG всю информацию можно разделить на абстрактные и реальные модели. Абстрактные модели предоставляют общую семантическую информацию в виде произвольного описания MOF, в то время как реальные модели должны представлять сами uml диаграммы. XMI не имеет жесткой стандартизации, а его описание содержит лишь предложения для реализации. В настоящий момент несколько крупных производителей имеют свои собственные реализации представления xmi, лишь косвенно основанных на основном стандарте, что делает невозможным переносимость файлов между различными редакторами UML.

Для гибкости модели в xmi не описываются напрямую связи между вершинами. Вместо этого для каждой вершины приписывается список входных и выходных переходов. Каждый переход содержит информацию о исходящей и входящей вершине и логическое условие для срабатывания перехода. Таким образом, для поиска исходящих вершин мы проходим по всем переходам и уже из них получаем вершины. Стоит отметить, что у вершины может быть несколько входных и выходных переходов, но каждый переход имеет лишь одну родительскую вершину и одну целевую.

1.4 Сети Петри

Сети Петри разрабатывались специально для моделирования таких систем, которые содержат взаимодействующие параллельные компоненты. В своей докторской диссертации *Связь автоматов* Карл Адам Петри сформулировал основные понятия теории связи асинхронных компонент вычислительной системы. В частности, он подробно рассмотрел описание причинных связей между событиями. Его диссертация посвящена главным образом теоретической разработке основных понятий, с которых начали развитие сети Петри. [4]

Реальные дискретные системы состоят из разнообразных компонентов, различающихся физическими свойствами, функциональным назначением, сложностью внутренней структуры. Для того, чтобы спроектировать адекватный математический аппарат, предназначенный для моделирования систем, необходимо установить круг вопросов, которые должны решаться с помощью моделей и осуществить переход от физических сущностей к их абстракциям, сначала в форме некоторого набора концептуальных понятий, затем — в точных математических терминах.

Часто при проектировании системы необходимо узнать, выполняет ли система те функции, для которых она предназначена; функционирует ли она эффективно; могут ли в ней возникнуть ошибки и аварийные ситуации; имеются ли в ней узкие места.

Первый шаг на пути к построению модели дискретной системы — это абстрагирование от конкретных физических и функциональных особенностей ее компонентов. Компоненты системы и их действия представляются абстрактными событиями, каковыми могут быть, например, исполнение оператора программы, переход триггера из состояния в состояние, прерывание в операционной системе и т.п.

Событие может произойти один раз, повториться многократно, порождая конкретные действия, или не произойти ни разу. Совокупность действий, возникающих как реализация событий при функционировании дискретной системы, образует процесс, порождаемый этой системой. В общем случае одна и та же система может функционировать в одних и тех же условиях по-разному, порождая некоторое множество процессов, т.е. функционировать недетерминированно.

Реальная система функционирует во времени, события происходят в некоторые моменты времени и длятся некоторое время. В синхронных моделях дискретных систем события явно привязаны к определенным моментам или интервалам времени, в которые происходит одновременное изменение состояний всех компонентов системы, трактуемое как изменение общего состояния системы. Смена состояний происходит последовательно. Этот подход к моделированию больших параллельных систем имеет ряд недостатков.

Во-первых, в большой системе приходится учитывать состояние всех компонентов при каждой смене ее общего состояния, что делает модель громоздкой, особенно в тех случаях, когда локальные изменения касаются небольшого фрагмента системы.

Во-вторых, при таком подходе исчезает информация о причинно-следственных связях между событиями в системе. Например, если два события при функционировании системы произошли одновременно, то мы не знаем, произошло ли это случайно или в этом факте скрыт какой-то функциональный смысл. Такие понятия, как конфликты между компонентами системы (из-за ресурсов) или ожидание одним из компонентов результатов работы других компонентов, трудно выражаются в терминах смены состояний системы.

В-третьих, в так называемых асинхронных системах события могут происходить внутри неопределенно больших интервалов времени, заранее трудно или нельзя указать более точно время их начала, конца и длительность.

Выходом может служить отказ от введения в модели дискретных систем времени и тектированных последовательностей изменений состояний, а замена их причинно-следственными связями между событиями. Модели такого типа (в том числе сети Петри) называют асинхронными. (Если возникает необходимость осуществить привязку ко времени, то моменты или интервалы времени представляют как события. Таким образом, существенно синхронные системы могут описываться в терминах асинхронных моделей.) Замена временных связей причинно-следственными дает возможность более наглядно описать структурные особенности функционирования систем.

Отказ от времени приводит к тому, что события в асинхронной модели рассматриваются или как элементарные (неделимые, «мгновенные»), или как составные, имеющие некоторую внутреннюю структуру, образованную из «подсобытий».

Взаимодействие событий в больших асинхронных системах имеет, как правило, сложную динамическую структуру. Эти взаимодействия описываются более просто, если указывать не непосредственные связи между событиями, а те ситуации, при которых данное событие может реализоваться. При этом глобальные ситуации в системе формируются с помощью локальных операций, называемых условиями реализации событий. Условие имеет емкость: условие не выполнено (емкость равна 0), условие выполнено (емкость больше 0), условие выполнено с n -кратным запасом (емкость равна n , где n - целое положительное число). Условие соответствует таким ситуациям в моделируемой системе, как наличие данного для операции в программе, состояние некоторого регистра в устройстве ЭВМ, наличие деталей на конвейере и т.п. Определенные сочетания условий разрешают реализоваться некоторому событию (предусловия события), а реализация события изменяет некоторые условия

(постусловия события), т.е. события взаимодействуют с условиями, а условия — с событиями.

Таким образом, предполагается, что для решения основных задач, озвученных ранее, достаточно представлять дискретные системы как структуры, образованные из элементов двух типов — событий и условий.

1.4.1 Моделирующие способности сетей Петри

К базовым элементам сетей Петри можно отнести позиции и переходы между ними. Переходы в сетях Петри изначально предназначены для представления событий, а позиции отражают условия для возможности их срабатывания. Маркер сети Петри может быть остановлен только в позиции, но не на переходе, так как переходы представляют собой атомарные действия.

Сети Петри по выразительной мощности превосходят такие классы моделей, как конечные автоматы, но все же не все системы можно моделировать с их помощью. Это заставило искать такие обобщения сетей, которые увеличивали бы их выразительную мощность.

Это приводит к универсальным моделирующим системам, порождающим рекурсивно-перечислимые классы языков, т.е. к системам, равномогущим машинам Тьюринга. Для дальнейшего исследования воспользуемся тем фактом, что машина Тьюринга равномогуща счетчиковому автомату (модификация машины Минского). В [4] приводится доказательство того, что любой рекурсивно перечислимый язык порождается некоторым счетчиковым автоматом.

Счетчиковый автомат состоит из конечного множества счетчиков $\{x_i : 1 \leq i \leq N\}$, алфавита и программы автомата. Программа представляет из себя связный ориентированный граф с одной начальной вершиной без входных дуг, с одной заключительной вершиной без выходных дуг. Из остальных вершин выходит одна или две дуги. Вершинам приписаны операторы одного из шести типов:

- а) начальной вершине приписан «старт», единственный в программе;
- б) заключительной вершине приписан «стоп», единственный в программе;
- в) оператор прибавления единицы $x_i = x_i + 1$, может быть приписан вершине с одной входной дугой;
- г) оператор печати символа из алфавита автомата;
- д) оператор недетерминированного перехода;
- е) оператор условного вычитания единицы $if x_i \neq 0 then x_i = x_i - 1$.

Все операторы, кроме условного вычитания единицы можно промоделировать с помощью сети Петри. Причина этого состоит в том, что в сети Петри можно заметить (отметить это срабатыванием некоторого перехода) тот факт, что место сети изменило разметку с нулевой на ненулевую, но нельзя отметить факт измене-

ния разметки с ненулевой на нулевую. Таким образом из двух альтернатив ($x_i \neq 0$ и $x_i = 0$), содержащихся в операторе условного вычитания единицы, в сети Петри можно представить только первую, но нельзя отобразить проверку на ноль, т.к. сеть не может непосредственно среагировать на отсутствие фишки в месте (если место не ограничено).[5] Таким образом, для решения этих проблем вводится понятие ингибиторной сети и сети с приоритетами, которая строго мощнее класса сетей Петри.

При моделировании сетями Петри дискретных систем фишки часто соответствуют объектам, передаваемым от компонента к компоненту системы. Зачастую эти объекты имеют дополнительные атрибуты, позволяющие различать их и использовать эти различия для управления функционированием системы. Таким образом, мы приходим к модели сети Петри, в которой фишкам приписаны некоторые признаки, например цвет, а условие срабатывания переходов определяется таблицей, учитывающей цвета фишек. Такая сеть называется раскрашенной и является сетью, строго более мощной чем сеть Петри. Выразительная мощность раскрашенной сети Петри зависит от количества признаков. Класс сетей с конечным множеством признаком эквивалентен классу сетей Петри [4] [6], хотя при преобразовании могут значительно увеличиться размеры сети.

Логичной модификацией сети Петри так же является разделение ее работы на такты. Такая сеть называется синхронной. В начале такта выясняется какие переходы могут сработать, из них выбирается максимальное множество взаимной неконфликтных переходов, затем это множество переходов срабатывает обычным образом меняя разметку сети. Необходимо отметить, что внутри такта выбранное множество срабатываемых переходов не меняется. Эта идея дает решение для проблемы недетерминированности переходов сети, т.е. для каждого перехода вводится его приоритет и порядок срабатывания определяется старшинством приоритетов.

В сетях с приоритетами и синхронных сетях наметился отход от чисто локального принципа управления функционированием сети, принятого в сетях Петри, и переход к привлечению более глобальной информации о состоянии сети. Такой подход используется и в самомодифицирующихся сетях, в которых каждой дуге приписана модифицируемая кратность. Если кратность дуги — число, то она имеет смысл, что и кратность в сетях Петри. Но в качестве кратность может выступать символ q некоторого места, в этом случае кратность дуги переменна и равна текущей разметке $M(q)$ места q . Поскольку разметка места q может динамически меняться в процессе работы, то и кратность тех дуг, которым сопоставлен символ q , динамически меняется. Эта модификация интересна тем, что позволяет достаточно просто моделировать ингибиторные сети и сети с приоритетами, т.е. сеть равномощна машине Тьюринга.

Таблица 1.1 — Сравнение выразительной мощности сетей.

	Тип сети	Выразительная мощность
1	Обыкновенная сеть Петри	Используется для моделирования дискретных систем с разделяемым доступом.
2	Автоматная сеть	Сохраняющая и дерево достижимости для нее является конечным. Из-за этого ограничения эта разновидность сетей неприменима для моделирования систем с разделяемым доступом.
3	Раскрашенная сеть Петри	Такая модификация сети используется для упрощения сети за счет учета особенностей функционирования моделируемого объекта. Если множество признаков конечно, то сеть эквивалентна простой сети Петри.
4	Ингибиторные сети, сети с приоритетами и самомодифицирующиеся сети	Сеть описывает рекурсивно-перечислимые классы языков, равно мощные машинам Тьюринга. В связи с этим в [5] формулируется теорема о том, что проблема ограниченности, достижимости, эквивалентности по префиксным и терминальным языкам, пустоты этих языков неразрешима для этих сетей
5	Иерархические сети Петри	Иерархические сети являются обобщением регулярных сетей и служат для моделирования иерархических систем, которые наряду с неделимыми, атомарными компонентами, содержат составные компоненты, сами представляющие собой систему. Иерархическая сеть функционирует, переходя от разметки к разметке, как и регулярная сеть, но правила функционирования иерархической сети отличаются от соответствующих правил для регулярной сети. Эти различия вызваны наличием составных переходов, срабатывание которых является не мгновенным событием, как в сетях Петри, а составным действием. [4] Иерархическая сеть обладает такими же моделирующими способностями, что и машина Тьюринга.

1.4.2 Раскрашенные сети Петри

Теория раскрашенных сетей Петри разрабатывается более 20 лет рабочей группой (CPN Group) университета г.Орхуса (University of Aarhus, Denmark) под руководством профессора Курта Йенсена (Kurt Jensen). Этой группой разработана

основная модель, включающая использование типов данных и иерархических конструкций, определены концепции динамических свойств, развивается теория методов анализа.

Раскрашенная сеть Петри — это графоориентированный язык для проектирования, описания, имитации и контроля распределенных и параллельных систем. Графическими примитивами показывается течение процесса, а конструкциями специального языка имитируется необходимая обработка данных. Сеть представляет собой направленный граф с двумя типами вершин — позициями и переходами, при этом дуги не могут соединять вершины одного типа, т.е. граф является двудольным. Множество позиций (обозначаются эллипсом) описывают состояния системы. Переходы (обозначают прямоугольниками) описывают условия изменения состояний. Позиции называются входными для конкретного перехода, если направление дуги, указывает на переход. Позиции называются выходными для перехода, если дуга ведет от перехода к позиции.

В отличие от простых сетей Петри, в раскрашенных немаловажную роль играет типизация данных, основанная на понятии множества цветов, которое аналогично типу в декларативных языках программирования. Соответственно, для манипуляции цветом применяют переменные, функции и другие элементы, известные из языков программирования. Ключевой элемент сети — позиция — имеет определенное значение из множества цветов. [7]

Для отражения динамических свойств в сеть Петри введено понятие разметки сети, которая реализуется с помощью так называемых фишек, размещаемых в позициях. Цвет позиции определяет тип фишек, которые могут там находиться. Конкретизация фишки, находящейся в данной позиции, определяется инициализирующим выражением начальной разметки или формируется в результате правильного выполнения шага итерации сети Петри.

Сеть представляет собой асинхронную систему, в которой фишки перемещаются по позициям через переходы. Переход может сработать (т.е. переместить фишку из входной позиции в выходную для данного перехода), если во всех входных позициях для данного перехода присутствует хотя бы одна фишка и выполнено логическое выражение, ограничивающее переход (спусковая функция).

Дуги могут иметь пометки в виде выражений (переменных, констант или функций), определенных для множества цветов, и использоваться либо для «вычленения» компонентов сложного цвета фишек при определении условия срабатывания перехода, либо для изменения цвета фишки следующей позиции после срабатывания перехода. [8]

1.5 Анализ сетей Петри

С помощью Сетей Петри можно моделировать широкий класс систем, представляя должным образом взаимодействие различных процессов. Наиболее мощны сети Петри в моделировании систем, включающих параллельные действия, причем параллельность моделируется естественным образом. Однако одно моделирование малополезно, необходимо провести анализ моделируемой системы. Для анализа используются два подхода: дерево достижимости и матричный метод.

В ходе анализа рассматриваются вопросы безопасности, ограниченности, сохранения, активности и достижимости в сети.

Безопасность и ограниченность

Сеть является ограниченной, если число фишек в каждой позиции не превышает N . Безопасность — это частный случай ограниченности. Безопасность позволяет представить позицию триггером, но в более общем случае можно использовать счетчик. Однако любой аппаратно-реализованный счетчик ограничен по максимальному числу, которое он может представить.

Позиция $p_i \in P$ сети Петри $C = (P, T, I, O)$ с начальной маркировкой μ является k -безопасной, если $\mu'(p_i) \leq k$ для всех $\mu' \in R(C, \mu)$.

Сохранение

Сеть является сохраняющей, если общее число фишек в системе не изменяется. Данное условие крайне важно в случае, если фишки представляют собой некоторые системные ресурсы.

Активность

Сеть Петри является активной, если в ней не могут возникнуть тупики. Тупик в сети Петри — это переход (множество переходов), которые не могут быть запущены. Переход называется активным, если он не тупиковый. Существует пять уровней активности:

- а) Переход t_i обладает **активностью уровня 0**, если он никогда не может быть запущен.
- б) Переход t_i обладает **активностью уровня 1**, если он потенциально запустим, т.е. существует такая $\mu' \in R(C, \mu)$, что t_i разрешен в μ' .
- в) Переход t_i обладает **активностью уровня 2**, если для всякого целого n существует последовательность запусков, в которых t_i присутствует по крайней мере n раз.

г) Переход t_i обладает **активностью уровня 3**, если существует бесконечная последовательность запусков, в которых t_i присутствует неограниченно часто.

д) Переход t_i обладает **активностью уровня 4**, если для всякой $\mu' \in R(C, \mu)$ существует такая последовательность запусков σ , что t_i разрешен в $\delta(\mu', \sigma)$.

Переход, обладающий активностью уровня 0 называется пассивным. Переход, обладающий активностью уровня 4 называется активным.

Достижимость

Для данной сети Петри C с маркировкой μ определить $\mu' \in R(C, \mu)$. Это основная задача анализа сетей, т.к. остальные задачи сводятся к задаче достижимости.

1.5.1 Дерево достижимости

Дерево достижимости представляет множество достижимости Сети Петри. Каждая i -я вершина дерева связывается с расширенной разметкой $\mu(i)$. В расширенной разметке число меток в позиции может быть либо неотрицательным целым, либо бесконечно большим. Бесконечное число меток обозначим символом ω . Каждая вершина классифицируется или как граничная, терминальная, дублирующая вершина, или как внутренняя. Граничными являются вершины, которые еще не обработаны алгоритмом. После обработки граничные вершины становятся либо терминальными, либо дублирующими, либо внутренними. Терминальные (пассивные) маркировки — это маркировки в которых нет разрешенных переходов. Дублирующие маркировки — это маркировки, ранее встречающиеся в ранее встречающиеся в дереве.

Дерево достижимости можно использовать для решения задач безопасности, ограниченности и сохранения. Его нельзя использовать для решения задач достижимости и активности в общем случае. Решение этих задач ограничено существованием символа ω . Символ ω означает потерю информации; конкретные количества фишек отбрасываются, учитывается только существование их большого числа. [5] Вместе с тем, в отдельных конкретных случаях дерево достижимости позволяет судить о свойствах достижимости и активности. Например, сеть, дерево достижимости которой содержит терминальную вершину, не активна. Аналогично искомая маркировка μ в задаче достижимости может встретиться в дереве достижимости, что означает ее достижимость. Кроме того, если маркировка не покрывается некоторой вершиной дерева достижимости, то она недостижима.

1.5.2 Матричный способ

Второй подход к анализу сетей Петри основан на матричном представлении сетей Петри. Альтернативный по отношению к определению сети Петри в виде (P, T, I, O) является определение двух матриц D^+ и D^- , представляющих входную

и выходную функцию. Каждая матрица имеет m строк (по одной на переход) и n столбцов (по одному на позицию).

Матричная форма эквивалентна стандартной форме, но позволяет дать определение в терминах векторов и матриц. Пусть $e[j]$ — m -вектор, содержащий нули везде, кроме j -ой компоненты. Переход t_j представляется m -вектором $e[j]$. Переход в t_j в маркировке μ разрешен, если $\mu \geq e[j] * D^-$, а результат запуска перехода t_j в маркировке μ записывается как:

$$\delta(\mu, t_j) = \mu - e[j] * D^- + e[j] * D^+ = \mu + e[j] * (D^+ - D^-) = \mu + e[j] * D, \quad (1.1)$$

где $D = D^+ - D^-$ — основная матрица изменений.

Маркировка μ' достижима из маркировки μ , если существует последовательность (возможно, пустая) запусков переходов σ , которая приводит из μ' в μ . Следовательно, получаем, что μ' достижима из μ , если

$$\mu' = \mu + x * D \quad (1.2)$$

имеет решение в неотрицательных целых.

Матричный подход к анализу сетей Петри очень перспективен, но имеет некоторые трудности. Прежде всего, матрица D не полностью отражает структуру сети: переходы, имеющие как входы, так и выходы из одной позиции (петли), представляются соответствующими элементами матриц D^+ и D^- , но затем уничтожаются в матрице $D = D^+ - D^-$.

Основная проблема заключается в том, что решение уравнения 1.2 является необходимым для достижимости, но не достаточным.

2 Конструкторский раздел

2.1 Этапы решения поставленной задачи

Исходными данными для задачи является описание диаграммы деятельности с помощью XMI. По этому описанию строится UML диаграмма и преобразуется в простую сеть Петри. Для построения раскрашенной сети из описания диаграммы выделяются используемые переменные и строится предварительное описание типов. После задания пользователем начальной разметки на основе предварительных данных о типах переменных строится окончательное множество типов и раскрасок. И с учетом видимости переменных выстраивается раскраска сети. Общий процесс функционирования представлен на рис. 2.1.

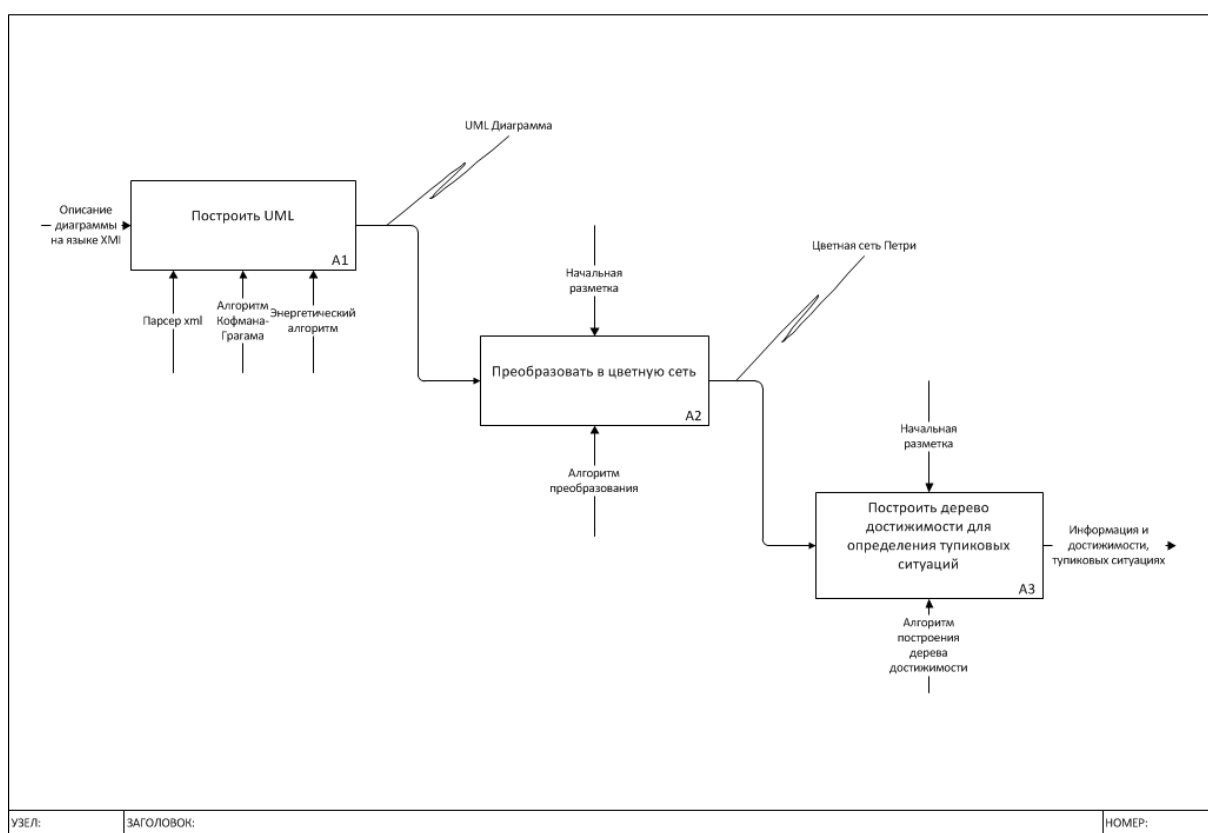


Рисунок 2.1 — Общий процесс функционирования.

Диаграмма деятельности представляет собой граф, вершины которого обозначают действия, а дуги — переходы от одного действия к другому. Способы преобразования UML-диаграмм в простую сеть Петри широко известны, но для преобразования в раскрашенную сеть одних данных диаграммы не хватает: для раскрашенной сети необходимо сформировать множество типов и определить раскраски вершин (т.е. определить тип входных переменных). Процесс преобразования в раскрашенную сеть Петри представлен на рис. 2.2.

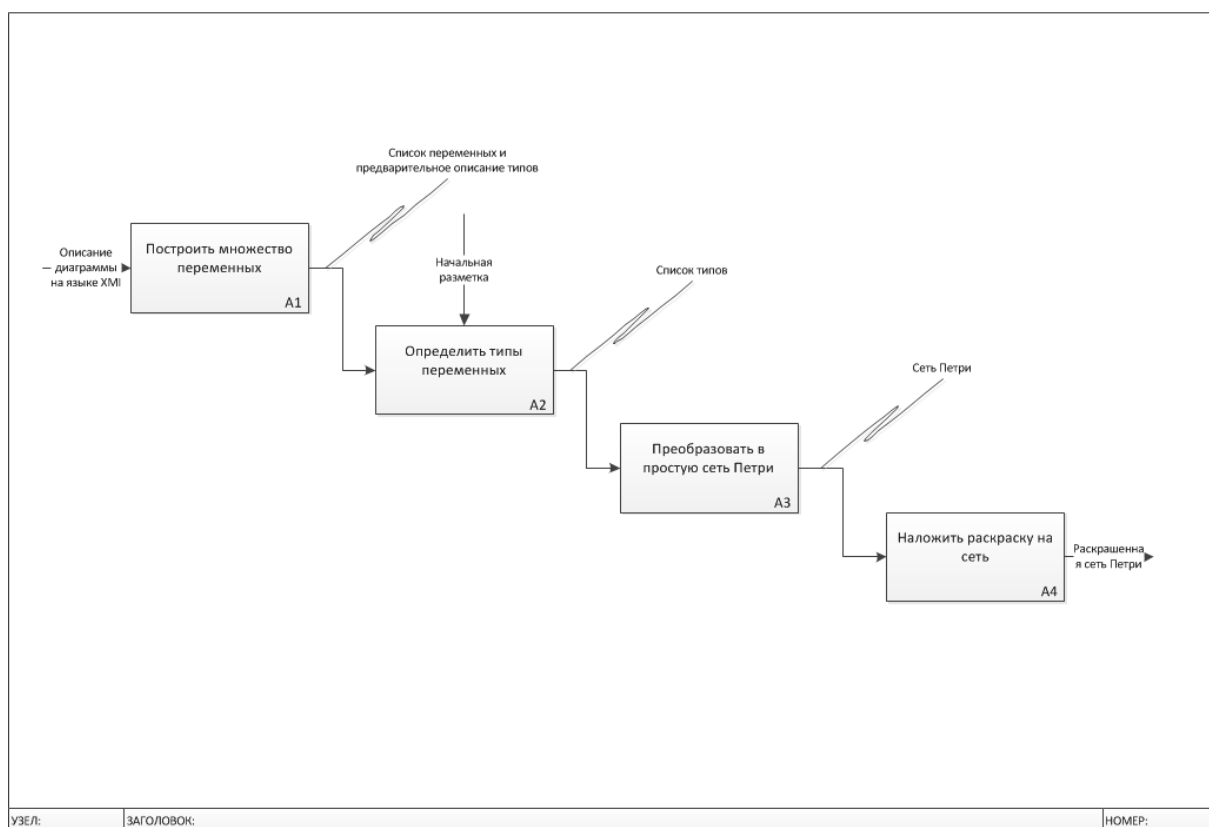


Рисунок 2.2 — Процесс преобразования UML диаграммы деятельности в раскрашенную сеть Петри.

2.2 Построение диаграммы деятельности

2.2.1 Алгоритм Кофмана-Грагама

2.2.2 Энергетический алгоритм

2.3 Описание UML диаграмм с помощью XMI

Для описания диаграммы деятельности используется стандарт XMI. Каждая вершина имеет имя, тип и уникальный идентификатор, описанные как атрибуты, и список входных и выходных вершин. Идентификатор используется для связи между вершинами и переходами. Если вершина имеет тип *action*, то она может содержать описание действий, по которым в дальнейшем будет выстраиваться множество переменных.

Каждый переход имеет строго одну исходящую и входящую вершину и может содержать в себе правила защиты перехода (например, для условного перехода *condition*).

Основываясь на описанных правилах, получим структуру описания диаграммы:

Листинг 2.1 — Структура XMI файла

```
1 <activity_diagram>
2   <states>
3     <state id, name, type>
4       <incoming transitions>
5       <outgoing transition>
6       <action>
7     </state>
8   </states>
9   <transitions>
10    <transition id>
11      <source state>
12      <target state>
13      <guard>
14    </transition>
15  </transitions>
16 </activity_diagram>
```

2.4 Преобразование диаграммы деятельности в раскрашенную сеть Петри

Наибольшей сложностью в процессе преобразования диаграммы в раскрашенную сеть Петри является формирование самой раскраски сети. Не существует

четких правил, по которым можно определить достаточность раскраски, а так же возникает проблема избыточности, при которой сформированная сеть не будет точно моделировать работу диаграммы или не будет работать вовсе из-за невозможности совершения перехода.

Сам алгоритм построения раскрашенной сети Петри можно разделить на четыре этапа:

1. построение списка используемых переменных по описанию диаграммы;
2. задание начальной разметки и формирование множества типов для соответствующих переменных;
3. преобразование диаграммы в простую сеть Петри;
4. формирование раскраски сети с учетом начальной разметки и границ видимости переменных.

Исходя из общих правил формирования множества раскрасок, необходимо каждое составное действие разделить на объект, субъект и само действие (2.3).

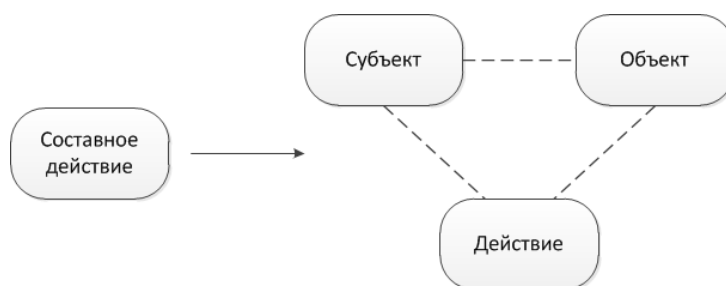


Рисунок 2.3 — Треугольник сложного действия.

Сначала выделяются субъект и объект действия. Если на объект действия накладываются условные ограничения (не всегда может быть доступен, например, канал передачи данных, свободный блок оперативной памяти и т.п.), его необходимо отделить от субъекта действия, так как в сети Петри он будет обеспечивать второе условие для срабатывания перехода действия. Субъект и объект действия в общем случае связаны правилом, в соответствии с которым это действие происходит. [9]

2.4.1 Получение списка переменных

На первом этапе построения раскрашенной сети необходимо рассмотреть множество переменных, описывающих работу диаграммы. Условимся, что если переменные (в любой части описания переменной) имеют одинаковые имена, то они имеют и одинаковые типы.

На основе этого мы можем построить предварительное описание типов. Предположим, что на диаграмме имеются три блока действия:

1. `player.cell = field.cell;`
2. `player.resource = player.resoure + field.resource;`
3. `player.resource = player.resoure - resource.`

По этому описанию можно заключить, что в системе фигурируют три переменные: `player`, `field` и `resource`, причем первые две имеют составной тип. Так же получаем то, что типы `player` и `resource` имеют одинаковое описание типов: *cell, resource*, причем тип всех переменных `resource` одинаковый. Таким образом, после первого этапа анализа получаем:

```

1 player : struct { cell , resource }
2 field : struct { cell , resource }
3 resource : simple type

```

2.4.2 Введение начальной разметки

На втором этапе пользователю предлагается задать входные данные для диаграммы, основываясь на переменных, выделенных на первом этапе. Основываясь на этих значениях, можно построить заключение о типах переменных. Остановим выбор на трех простейших типах: *integer*, *boolean*, *string*, из которых можно образовывать кортежи и сложные структуры.

Для примера, приведенного на первом этапе, построим множество типов:

```

1 player : [ ((1, 1), 0) ]
2 field : [ ((1, 2), 2); ((1, 3), 1); ((2, 1), 1); ... ]
3 resource : 1

```

Учитывая предварительное описание типов, получаем

```

1 player : struct { cell : (int * int), resource : int }
2 field : struct { cell : (int * int), resource : int }
3 resource : int

```

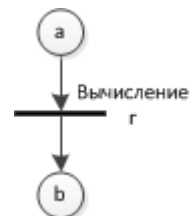
2.4.3 Преобразование в простую сеть Петри

Диаграмма деятельности во многом подобна сетям Петри. Но в сетях Петри действия моделируются переходами, а на диаграмме деятельности узлами. Кроме того, если в диаграмме деятельности движение фишки необходимо приостановить, то это делается между узлами на дугах, а не внутри блока. Таким образом, правильный перевод в сеть Петри заменяет узлы на переходы, а дуги на позиции. Узлы диаграммы представляются по-разному, в зависимости от типа (2.4):

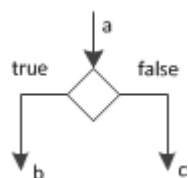
Условия для принятия решения в сетях Петри задаются как свойства соответствующих переходов. Позиция, предшествующая ветвлению, имеет два выхода,



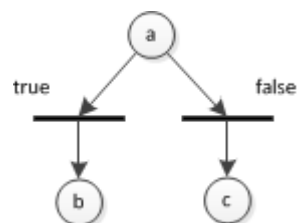
1.



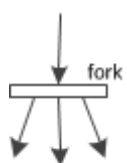
2.



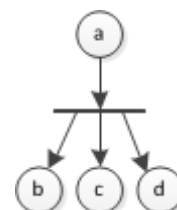
3.



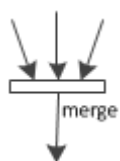
4.



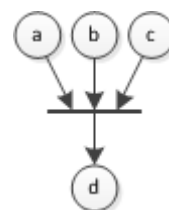
5.



6.



7.



8.

Рисунок 2.4 — Преобразование узлов диаграммы деятельности в сеть Петри.
 деятельность; 3,4 условие; 5,6 ветвление; 7,8 синхронизация.

и маркер позиции перейдет через тот переход, условию которого удовлетворяет его значение. Стоит отметить потенциальную возможность ошибок, предупреждение которых целесообразно рассматривать как одно из формальных правил.

— Если для переходов ветвления не заданы условия их срабатывания, возникает неопределенность, в какую ветку перейдет маркер.

— В случае если ни одно из условий не является истинным, переход становится недоступным — маркер остается в своей позиции.

2.4.4 Наложение раскраски

На последнем этапе необходимо получить раскраску сети. Раскраска характеризуется кортежем типов. Главной проблемой является формирование множества состояний, принадлежащих некоторому типу.

Если стартовую разметку содержит не только начальная вершина, но и вершина, имеющая входные дуги, то для выходного перехода из этой вершины добавляется еще одна вершина, не имеющая входных дуг, и содержащая разметку.

Будем считать, что тип, сформированной стартовой разметкой начальной вершины присущ каждой вершине, которая достижима из нее. Раскраски остальных вершин, отличных от начальной будем выводить следующим образом: если вершина содержит некоторую переменную, то для всех путей, для которых встречается эта переменная, формируется новый цвет, состоящий из типа текущей раскраски и типа переменной.

2.5 Алгоритм построения дерева достижимости

Алгоритм начинает свою работу с определения начальной разметки. До тех пор, пока имеются граничные вершины, они обрабатываются алгоритмом.

Пусть x — граничная вершина, которую необходимо обработать, и с которой связана разметка $\mu(x)$.

а) Если в дереве имеется другая вершина y , не являющаяся граничной, и с ней связана разметка $\mu(y) = \mu(x)$, то вершина x дублируется.

б) Если для разметки $\mu(x)$ ни один из переходов неразрешим, т.е. $\mu(x)$ тупиковая разметка, то x терминальная вершина.

в) Для любого перехода t_j , из множества T разрешенного в разметке $\mu(x)$, создать новую вершину z дерева достижимости. Разметка $\mu(z)$, связанная с этой вершиной, определяется для каждой позиции p_i следующим образом:

1) если $\mu(x)_i = \omega$, $\mu(z)_i = \omega$;

2) если на пути от корневой вершины к x существует вершина y такая, что $\mu(y) \rightarrow^{t_j} \mu(x)$, $\mu(y) < \mu(x)$, $\mu(y)_i < \mu(x)_i$, то $\mu(z)_i = \omega$;

3) в противном случае $\mu(z)_i = \mu(x)_i$.

Дуга, помеченная t_j , направлена от вершины x к вершине z . Вершина x переопределяется как внутренняя, вершина z становится граничной. Когда все вершины дерева становятся терминальными, дублирующими или внутренними, алгоритм останавливается. Из алгоритма построения дерева достижимости следуют следующие выводы:

- сеть ограничена тогда и только тогда, когда символ ω отсутствует в дереве;
- сеть безопасна, если число фишек в каждой позиции не превышает 1;
- сеть живая, если в дереве отсутствуют циклы и тупики.

Список использованных источников

1. Д., Паронджанов В. Теоретические основы языка ДРАКОН / Паронджанов В. Д. — М.: Новая книга, 1995.
2. Ермаков И. Е., Жигуненко Н. А. Двумерное структурное программирование; класс устремлённых графов. (Теоретические изыскания из опыта языка «ДРАКОН» / Жигуненко Н. А. Ермаков И. Е. // Сборник трудов V Международной конференции «Инновационные информационно-педагогические технологии в системе ИТ-образования». — М.: МГУ, 2010. — Рр. 452–461.
3. Тюгашев, А. А. Графические языки программирования и их применение в системах управления реального времени / А. А. Тюгашев. — Самара: Научный центр РАН, 2009.
4. В.Е., Котов. Сети Петри / Котов В.Е. — М.: Наука, 1984.
5. Дж., Питерсон. Теория сетей Петри и моделирование систем / Питерсон Дж. — М.: Мир, 1984.
6. Jensen K., Kristensen L.M. Coloured Petri nets. Modelling and validation of concurrent systems / Kristensen L.M. Jensen K. — N.Y.: Springer Dordrecht Heidelberg, 1998.
7. В., Шахов. Моделирование программно-аппаратных «реактивных» систем раскрашенными сетями Петри / Шахов В. // *RSDN Magazine*. — 2006. — no. 3.
8. Kristensen L.M. Christensen S., Jensen K. The practitioner's guide to Coloured Petri Nets / Jensen K. Kristensen L.M., Christensen S. — N.Y.: Springer, 1998.
9. С.В., Коротиков. Применение сетей Петри в разработке программного обеспечения центров дистанционного контроля и управления: Ph.D. thesis / НГТУ. — 2007.