

ТЕМПОРАЛЬНЫЕ СЕТИ ПЕТРИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Александр Еремеев, Юрий Королев

Аннотация: Работа посвящена методам моделирования сложных процессов в динамических системах на основе модифицированных (расширенных) сетей Петри (СП), позволяющих учитывать временные зависимости и неопределенность в имеющейся информации. Анализируются различные расширения и модификации СП и предлагается расширение класса цветных СП – цветные СП с поддержкой темпоральной логики Аллена - в плане использования данного аппарата в интеллектуальных системах поддержки принятия решений (ИСППР), включая перспективные ИСППР реального времени (ИСППР РВ).

Ключевые слова: моделирование, сети Петри, цветные сети Петри, представление временных зависимостей, принятие решений, реальное время, интеллектуальные системы поддержки принятия решений.

ACM Classification Keywords: H.4.2 [Information systems applications]: Types of systems – Decision support; I.2.3 [Artificial intelligence]: Deduction and Theorem Proving – Uncertainty, "fuzzy," and probabilistic reasoning; I.2.4 [Artificial intelligence]: Knowledge Representation Formalisms and Methods – Temporal logic.

Введение

На кафедре прикладной математики Национального исследовательского университета «МЭИ» более двадцати лет активно проводятся исследования по разработке математического и программного обеспечения интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ИСППР), в том числе наиболее сложных ИСППР реального времени [Вагин, 1988][Еремеев и др., 1994].

Большинство имеющихся объектов управления относятся к слабо структурированным или плохо формализуемым объектам, которые обладают рядом нетипичных для традиционного управления свойств, таких как: уникальность, отсутствие формализуемой цели существования и количественного критерия оптимальности, высокая динамичность, неполнота описания объекта и, наконец, индивидуальность и субъективность поведения лица, принимающего решения (ЛПР).

В последние годы технология решения информационных задач значительно изменилась. Основное назначение информационных систем – это своевременное представление необходимой информации ЛПР для принятия им адекватных и эффективных решений при управлении процессами, ресурсами, финансовыми транзакциями, персоналом или организацией в целом. Однако, в процессе развития информационных технологий, исследования операций и технологий моделирования, а также с возрастанием потребителей информационно-аналитической поддержки появляется потребность в системах, не только представляющих информацию, но и выполняющих некоторый ее предварительный анализ, способных давать некоторые советы и рекомендации, осуществлять прогнозирование развития ситуаций, отбирать наиболее перспективные альтернативы решений, т.е. поддерживать решения ЛПР, взяв на себя значительную часть рутинных операций, а также функции предварительного анализа и

оценок. Новая информационная технология основывается на интеллектуальных технологиях и теории искусственного интеллекта.

Возможны различные способы интеграции интеллектуальных систем, основанных на знаниях, с математическим моделированием. Разработка ИСППР с применением математических моделей является сегодня актуальным и перспективным направлением исследований.

Темпоральные модификации сетей Петри

Математическое моделирование предполагает эксперименты с математическими моделями систем. В отличие от физической модели, которая материальна, математическая модель является логическим объектом. Подобный подход позволяет разрабатывать системы, опираясь на уже разработанные теоретические выкладки, что существенно облегчает процесс. В зависимости от дальнейшего использования модели можно отнести к одному из следующих типов:

- *функциональные модели*, отображающие закономерности функционирования объектов и используемые при проектировании систем для исследования принципов их работы и характера протекающих процессов;
- *структурные модели*, отражающие структурные характеристики и используемые при конструировании систем в ситуациях, когда важными являются связи отдельных частей объектов между собой.

Очевидно, что гибридные модели, сочетающие особенности обоих перечисленных, могут обладать существенно большей выразительностью, что необходимо учитывать при выборе инструментов моделирования. Другим принципиально важным критерием являются характерные свойства моделируемой системы.

ИСППР РВ в общем случае является динамической нестационарной нелинейной системой. При выборе математической модели для моделирования таких систем необходимо учесть эти свойства. Также важно отразить не только закономерности функционирования, но и структурные характеристики системы. Очевидно, что для выявления конструктивных (структурных) закономерностей системы необходимо добиться максимальной визуальной выразительности. Поэтому для дальнейших исследований в качестве базовой модели был выбран один из графоориентированных инструментов моделирования: *сети Петри (СП)*.

СП – признанный инструмент моделирования и функционального анализа параллельных и распределенных вычислительных систем и процессов. СП позволяют естественно описывать синхронизацию, параллелизм, конфликт и причинную зависимость, а также наглядно представлять структуру и поведение систем, что делает их отличным потенциальным инструментом для разработки ИСППР. Основы теории обычных СП изложены, в частности, в работе [Котов, 1984]. Можно вводить ряд дополнительных правил и условий в алгоритмы моделирования, получая ту или иную разновидность СП. В частности, теория *цветных сетей Петри (ЦСП)* разрабатывается более 20 лет рабочей группой под руководством профессора Курта Йенсена [Jensen, 1992-1997]. ЦСП – 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. Показано [Jensen, 1992-1997], что для каждой ЦСП можно построить обычную СП, и наоборот. Таким образом, использование ЦСП не дает теоретических преимуществ, но на практике такие сети представляют собой более компактный и удобный язык моделирования, чем обычные СП.

Существенным недостатком как классических СП, так и ЦСП является отсутствие учета фактора времени. Это не позволяет эффективно моделировать те реальные процессы, в которых от текущего времени зависит состояние анализируемой системы. О важности наличия средств представления времени и темпоральных зависимостей в ИС говорится практически с момента появления таких систем. Особенно актуальна эта проблема встала именно в связи с появлением и развитием динамических ИС, типичным представителем которых являются ИСППР РВ [Куриленко, 2010], предназначенными для помощи ЛПР при управлении сложными объектами и процессами в условиях жестких временных ограничений и наличия различного рода неопределенности как в поступающей извне информации, так и в заложенных в систему знаниях. Важнейшей задачей при создании перспективных ИСППР РВ является задача представления и оперирования временными зависимостями.

Цветные сети Петри реального времени (ЦСП РВ) [Szpyrka et al., 2006] являются функциональным подклассом ЦСП, ориентированным на моделирование и анализ систем реального времени. По сравнению с ЦСП, в ЦСП РВ используется другая модель времени и приоритеты переходов, на них наложены некоторые структурные ограничения. Эти характеристики ЦСП РВ позволяют разработчикам производить прямое моделирование элементов, типичных для параллельного программирования, таких как приоритеты задач, таймауты и т.д.

Временные зависимости подразделяются на [Троицкий и др., 2003]:

- *количественные* (метрические) – когда для представления времени используются количественные меры на временной оси (например: «сбой произошел в 17.00»);
- *качественные* – когда используется только относительное положение во времени событий или действий (например: «сначала произошел сбой в системе питания, затем аварийное отключение»).

Аппарат ЦСП РВ предполагает работу с количественными временными зависимостями, однако ясно, что выразительность представления увеличится при наличии средств, позволяющих представление и оперирование также и качественными временными зависимостями. В числе одного из возможных путей решения этой проблемы предлагается модифицировать ЦСП РВ, добавив возможность использования аппарата временных логик, а именно, *темпоральную интервальную логику Аллена* [Allen, 1983], которая характеризуется достаточной выразительностью и наличием полиномиальных алгоритмов вывода, что позволяет использовать ее в интеллектуальных системах типа ИСППР РВ [Королев и др., 2011]. В качестве временных примитивов в ней используются интервалы, что важно при моделировании сложных систем. Точечные (оперирующие моментами) временные логики недостаточно чувствительны к смысловым различиям между глагольными предикатами.

Формальное определение ЦСП РВ с поддержкой логики Аллена приведено в [Королев и др., 2012]. Чтобы проиллюстрировать главные аспекты, приведем в качестве примера модель автоматической остановки поезда [Szpyrka et al., 2006]. В кабине машиниста каждые 60 секунд загорается световой сигнал, чтобы проверить, контролирует ли он идущий поезд. Если машинист проигнорирует световой сигнал, то через 6 секунд включается звуковой сигнал. Затем, если машинист не дезактивирует его в течение 3 секунд, срабатывает механизм аварийного торможения. Модель ЦСП РВ с поддержкой логики Аллена для данного примера, представленная на рис 1., содержит шесть мест:

- LightSig и SoundSig (контроль состояния индикаторов),
- Brake (механизм торможения),
- Driver (машинист поезда),
- Timer1 и Timer2 (таймеры);

и шесть переходов:

- TurnOnLS (включение светового сигнала),
- TurnOnSS (включение звукового сигнала),
- TurnOnBr (запуск механизма торможения),
- DisactLS и DisactSS (дезактивация машинистом соответствующих сигналов),
- Activity (моделирование действий машиниста).

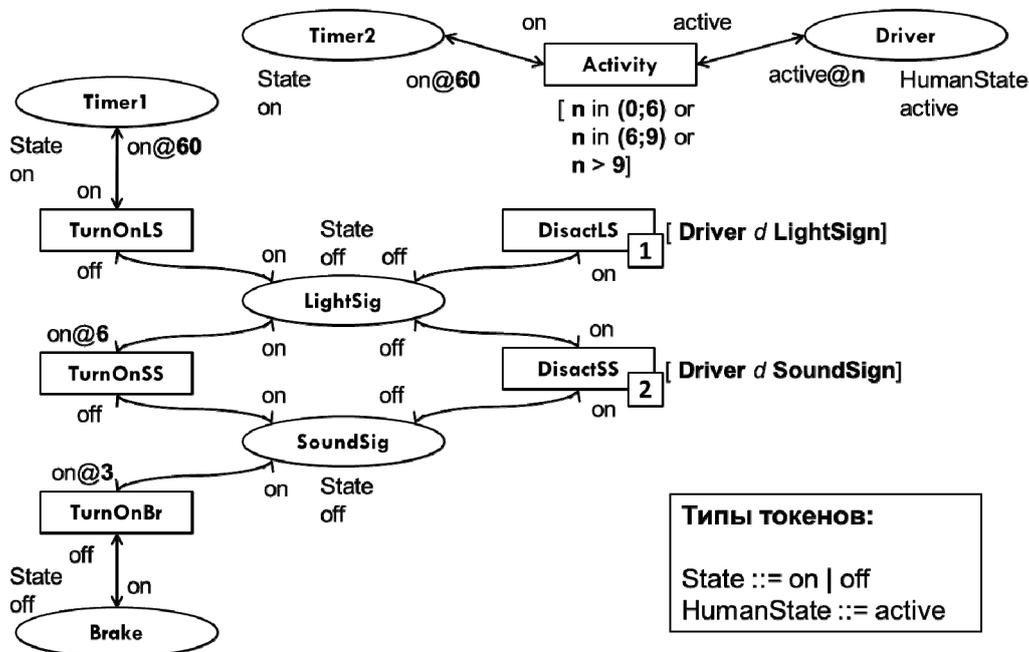


Рис. 1. Модель системы остановки поезда (ЦСП РВ с поддержкой логики Аллена)

Формулы логики Аллена применены в данном случае как защитные функции переходов DisactLS и DisactSS, обозначающих своевременную реакцию машиниста (ЛПР) на световой и звуковой сигнал соответственно:

- **Driver d LightSign** – переход DisactLS работает, если токен в месте Driver появится в тот момент, когда в месте LightSign будет находиться токен on;
- **Driver d SoundSign** – переход DisactSS работает, если токен в месте Driver появится в тот момент, когда в месте SoundSign будет находиться токен on.

Главным преимуществом в данном случае является возможность задавать не конкретное время реакции, как в случае ЦСП РВ, а интервалы, на которых ЛПР может дезактивировать систему и каждый из которых определяет дальнейшее поведение модели.

Таким образом, включение в модель аппарата интервальных темпоральных логик позволило корректно отразить неопределенность, присущую задаче, что является одним из основополагающих принципов при проектировании перспективных ИСППР РВ.

Разработка базового инструментария моделирования

Средства компьютерного моделирования в составе ИСППР РВ актуально как для теоретических исследований, так и для практического применения. Создание инструментария для решения подобной задачи представляет серьезную проблему, прежде всего потому, что среда разработки должна поддерживать концепцию реального времени, а также из-за существенной универсальности разрабатываемых моделей. Однако некоторые системы, в частности, инструментальный комплекс

конструирования систем реального времени G2 (Gensym Corp., США) позволяют реализовывать подобные проекты.

G2 – это объектно-ориентированная интегрированная среда для разработки и сопровождения приложений – интеллектуальных систем реального времени, использующих базы знаний. В отличие от систем, ориентированных на какую-то одну методологию или на конкретную предметную область, G2 интегрирует в себе множество взаимодополняющих методов искусственного интеллекта, что упрощает и ускоряет процесс разработки приложений и позволяет делать их достаточно универсальными [Чибизова и др., 1998]. Эти особенности позволили разработать в данной среде эффективный инструментарий для моделирования систем на основе ЦСП РВ с поддержкой логики Аллена. Модель системы остановки поезда, созданная средствами данного инструментария, приведена на рис. 2.

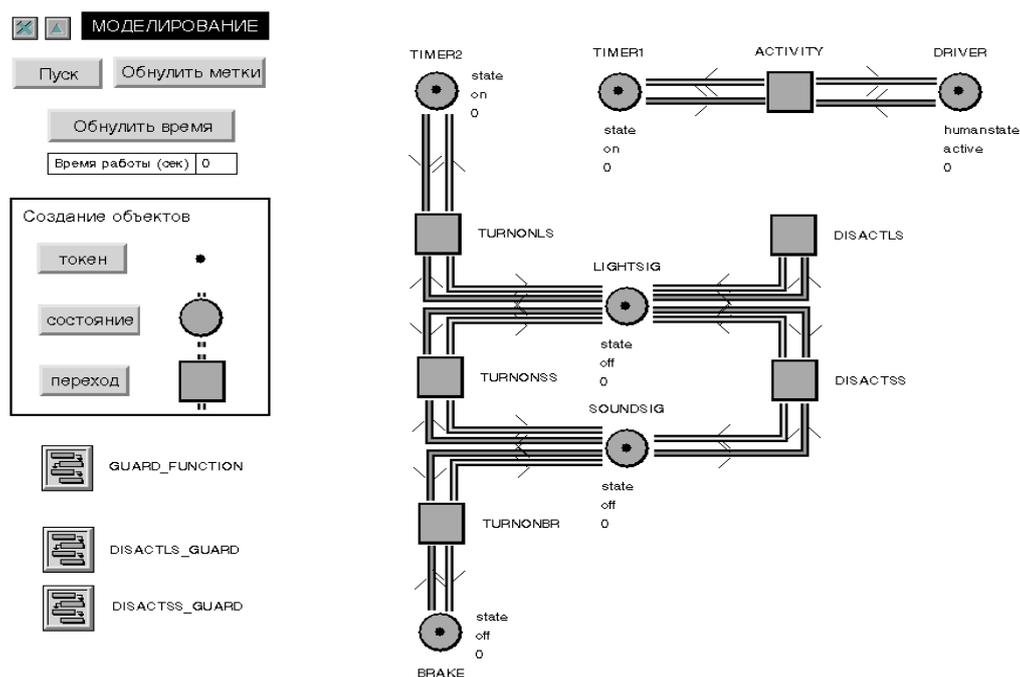


Рис. 2. Модель системы остановки поезда (среда G2)

Проведем моделирование при 9-тисекундной задержке реакции машиниста. В начальный момент одновременно параллельно срабатывают 2 независимых перехода TurnOnLS и Activity, изменив состояние сети на новое (рис. 3).

После этого в течение 6 секунд ни один переход не становится допустимым. По истечении этого времени срабатывает переход TurnOnSS, меняя цвет токена в месте SoundSig (рис. 4).

Через 3 секунды после этого становятся допустимыми 2 перехода: TurnOnBr и DisactSS. Но поскольку изначально приоритет последнего был установлен более высоким, сработает переход деактивации. При этом поменяются токены в местах LightSig и SoundSig, что не позволит сработать переходу TurnOnBr (рис. 5).

Далее в течение 51 секунды система останется стабильной, единственным изменением будет непрерывное уменьшение временных меток с установленным шагом в 1 секунду. После чего модель снова вернется к исходному состоянию, и сработают переходы при таймерах.

Изменяя значение временной метки дуги Activity-Driver, можно исследовать другие возможные варианты работы системы, таким образом, всесторонне изучив данную модель. Модель на основе ЦСП РВ с поддержкой логики Аллена системы остановки поезда отвечает требованиям корректности.

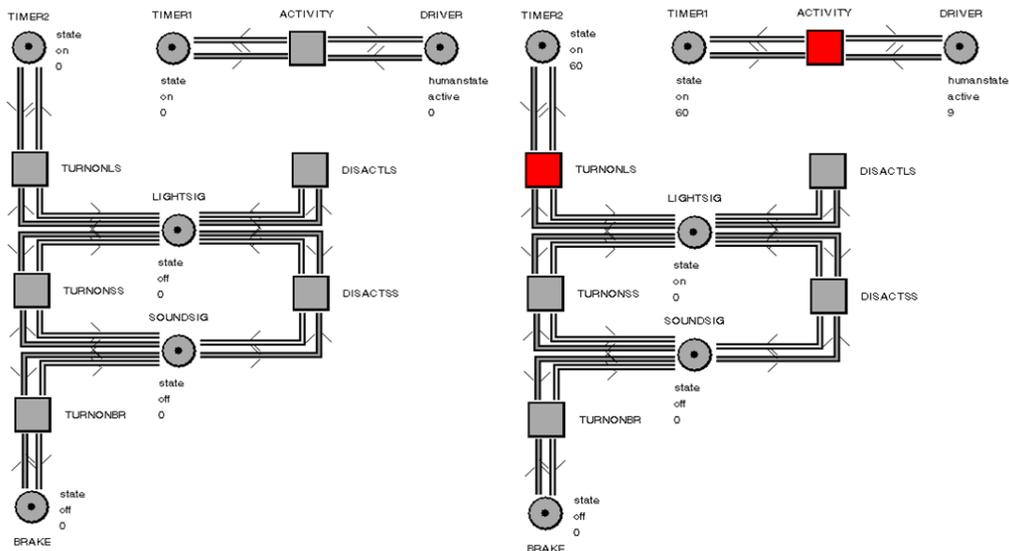


Рис. 3. Срабатывание переходов TurnOnLS и Activity

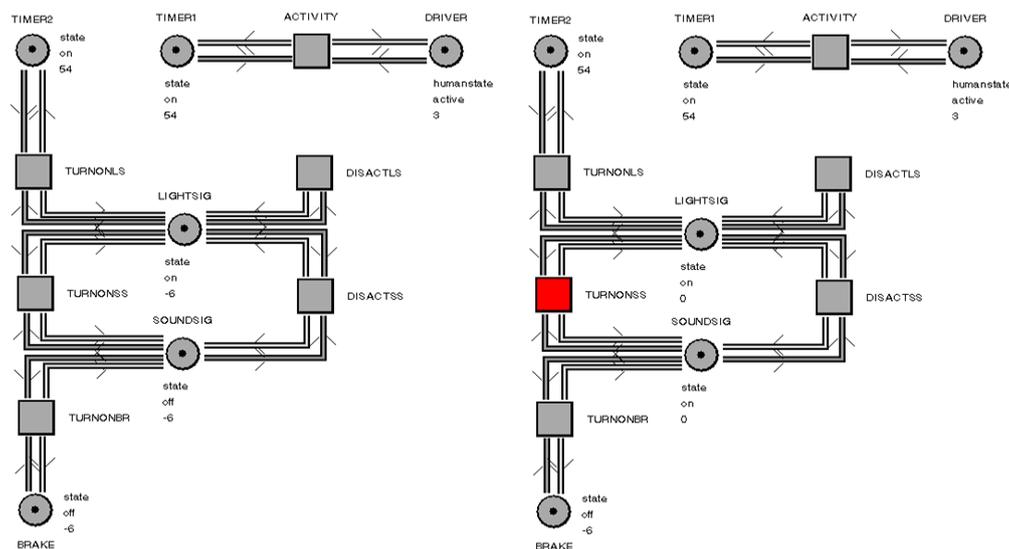


Рис. 4. Срабатывание перехода TurnOnSS

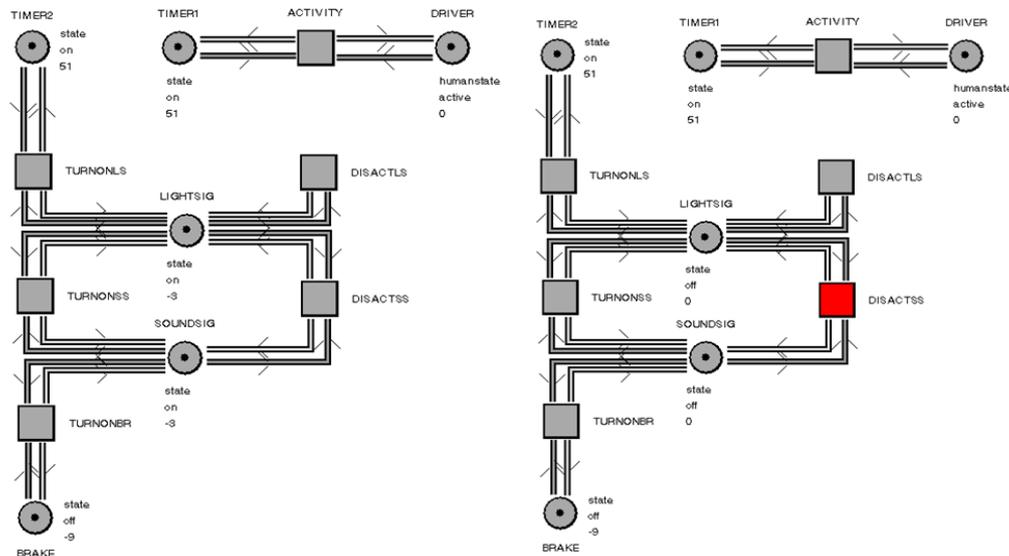


Рис. 5. Срабатывание перехода DisactSS

Методология создания моделей на основе цветных сетей Петри реального времени

Для повышения эффективности моделирования предлагается разбиение исходной ЦСП РВ на несколько подсетей, которые называют страницами. Особая форма иерархической ЦСП РВ, называемая канонической формой, была определена для ускорения и облегчения разработки моделей. ЦСП РВ в канонической форме состоят из четырех типов подсетей с жестко определенной структурой (рис. 6):

- исходные страницы мест,
- исходные страницы переходов,
- страницы связи,
- D-сети.

Такая модель описывает структуру соответствующей системы, а также ее поведение и функциональные аспекты (рис. 7). Исходные страницы мест (рис. 7, а) используются для представления активных объектов (т.е. объектов, осуществляющих деятельность) и их деятельности. Они ориентированы на представление объектов и находятся на высшем уровне иерархии страниц. Исходные страницы переходов (рис. 7, б) ориентированы на представление деятельности и расположены на втором уровне иерархии. Страницы связи (рис. 7, с) принадлежат функциональному уровню модели и используются, чтобы при необходимости представлять алгоритм, описывающий деятельность в деталях. Кроме того, страницы связи используются в качестве интерфейса для вставки соответствующих D-сетей в модель. D-сети (рис. 7, d) используются для представления систем, основанных на продукционных правилах, в форме сетей Петри. D-сеть содержит два места: условия и результата. Каждое правило вывода представлено переходом и его входной и выходной дугами. Токен, размещенный в месте условия, определяет последовательность условий правил. Аналогично, токен места результата определяет последовательность атрибутов результата. D-сети принадлежат к нижнему уровню модели.

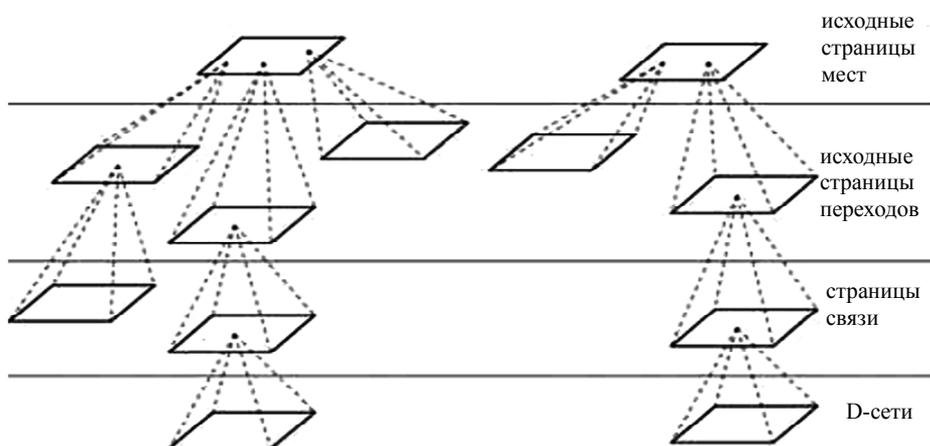


Рис. 6. Общая структура ЦСП РВ с поддержкой логики Аллена в канонической форме

Связи между отдельными страницами модели задаются на странице графа иерархии. Вершина такого графа представляет одну страницу, а дуга – связь с подстраницей с учетом заменяемого перехода.

Если рассматриваются временные свойства, то можно сосредоточиться на исходных страницах переходов и пропустить их подстраницы. Любая деятельность страниц связи начинается срабатыванием входного перехода и заканчивается срабатыванием выходного. Кроме того, каждое срабатывание входного перехода должно сопровождаться такой последовательностью срабатываний переходов, где

последним является выходной, а все промежуточные – вспомогательными. Такая модель деятельности подобна вызову процедуры в языках программирования.

Декомпозиция системы – первый шаг при разработке модели. Она начинается с определения типов объектов, которые входят в систему. Объекты делятся на активные, т. е. осуществляющие деятельность, и пассивные, которые не выполняют каких-либо собственных действий. Объект представляется основным местом. Для каждого объекта определяются список атрибутов и их типы. Декартово произведение типов задает тип соответствующего места. Создание исходных страниц мест завершает разработку на этой стадии.

Следующий этап разработки связан с описанием модели действий, что особенно важно для систем реакции. Переходы, размещенные в исходных страницах мест, как правило, являются заменяемыми переходами. Для каждого из них создается исходная страница перехода. Проектирование исходной страницы перехода подобно объявлению процедуры в языке программирования. Необходимо описать входные и выходные параметры. Если переход на исходной странице перехода не является заменяемым, то эта страница представляет собой полное определение деятельности, описываемой этим переходом. После завершения этого этапа, ЦСП РВ представляет все элементы, которые составляют моделируемую систему, и все ее действия.

Последний этап связан с разработкой функционального уровня системы. Для этого используются страницы связи и D-сети.

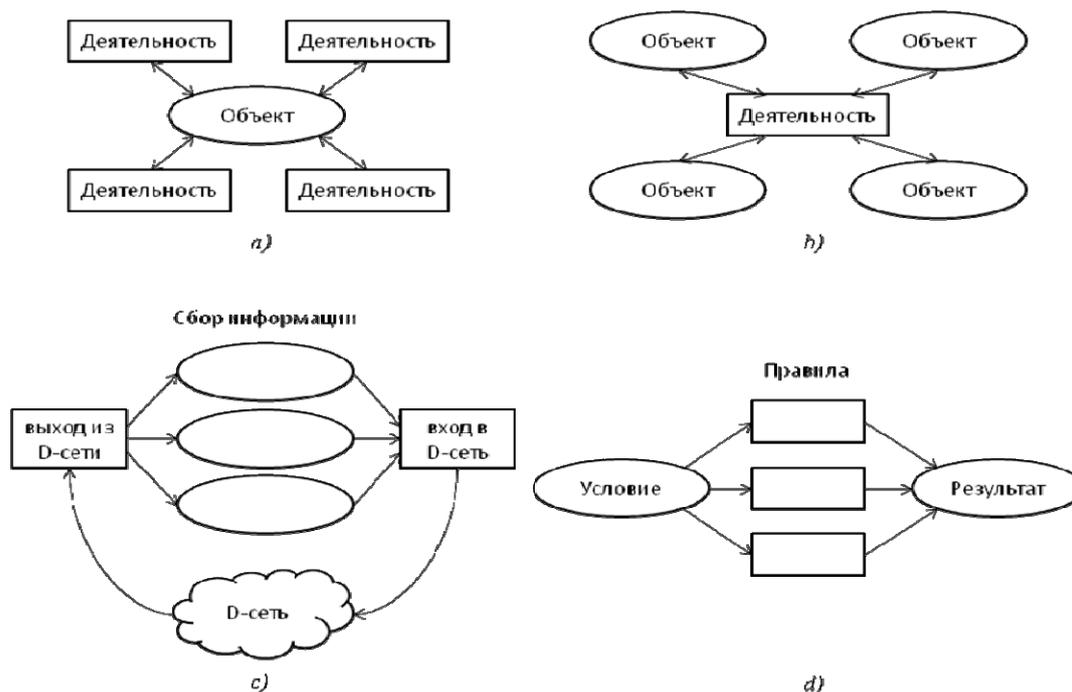


Рис. 7. Типы подсетей: а) исходные страницы мест; б) исходные страницы переходов; в) страницы связи; д) D-сети.

Заключение

В представленной работе исследованы временные подклассы сетей Петри в применении к моделированию интеллектуальных систем поддержки и принятия решений, в том числе реального времени. Рассмотрен аппарат цветных сетей Петри реального времени, приведен пример анализа модели, построенной на его основе. Предлагается новое расширение подкласса – цветные сети Петри с

поддержкой темпоральной логики Аллена, обуславливается его функциональность как аппарата, позволяющего моделировать как количественные, так и качественные временные задержки. Исследуется возможность моделирования сетей Петри с временными ограничениями в среде конструирования интеллектуальных систем реального времени G2. На основе результатов анализа разработаны базовые программные средства для моделирования с использованием сетей Петри, дано их описание и пример использования.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты №№ 11-01-00140, 11-07-00038.

Список литературы

- [Allen, 1983] Allen J.F. Maintaining knowledge about temporal intervals. – Communications of the ACM, 1983. – v. 26. – n. 11. – pp. 832-843. – ISBN:1-55860-095-7.
- [Jensen, 1992-1997] Jensen K. Coloured Petri Nets. Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. – 1992-1997. – vol. 1-3. – ISBN: 3-540-62867-3.
- [Szyrka et al., 2006] Szyrka M., Szmuc T. Integrated approach to modelling and analysis using RTCPnets. – IFIP International Federation for Information Processing. – New York, 2006. – vol. 227, pp. 115-120. – ISBN: 978-0-387-39387-2.
- [Вагин, 1988] Вагин В.Н. Дедукция и обобщение в системах принятия решений. – М.: Наука, 1988. – 384 с. – ISBN 5-02-013887-8.
- [Еремеев и др., 1994] Башлыков А.А., Еремеев А.П. Экспертные системы поддержки принятия решений в энергетике. – М.: Издательство МЭИ, 1994. – 216 с. – ISBN 5-7046-0044-1
- [Королев и др., 2011] Еремеев А.П., Королев Ю.И. Применение модифицированных сетей Петри при создании интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. научных трудов VI-й Международной научно-практической конференции (Коломна, 16-19 мая 2011 г.). В 2-х томах. Т2. – М.: Физматлит, 2011. –с. 744-754. - ISBN 978-5-9221-1328-1.
- [Королев и др., 2012] Еремеев А.П., Королев Ю.И. Средства моделирования на основе темпоральных сетей Петри для интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Тринадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012 (16-20 октября 2012 г., г. Белгород, Россия): Труды конференции. Т.3. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – Стр. 105-112 – ISBN 978-5-361-00183-5.
- [Котов, 1984] Котов В.Е. Сети Петри – М.: Наука, 1984. – 160 с.
- [Куриленко, 2010] Еремеев А.П., Куриленко И.Е. Средства темпорального вывода для интеллектуальных систем реального времени. – Интеллектуальные системы. Колл. моногр. – Вып. 4. – М.: Физматлит, 2010. – с. 222-252.
- [Троицкий и др., 2003] Еремеев А.П., Троицкий В.В. Модели представления временных зависимостей в интеллектуальных системах поддержки принятия решений. – Изв. РАН. Теория и системы управления, 2003. – № 5. – с. 75-88.
- [Чибизова и др., 1998] Еремеев А.П., Чибизова Н.В. Проектирование экспертных систем реального времени на основе инструментального комплекса G2. Методологические указания – М.: Издательство МЭИ – 1998.
-

Сведения об авторах

Еремеев Александр Павлович – д.т.н., проф., заведующий кафедрой Прикладной математики Московского энергетического института, 111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., 14; e-mail: eremeev@appmat.ru. Область научных интересов: искусственный интеллект, принятие решений, экспертные системы

Королев Юрий Ильич – м.н.с., аспирант кафедры Прикладной математики Московского энергетического института, 111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., 14; e-mail: korolevyu@gmail.com. Область научных интересов: искусственный интеллект, принятие решений, моделирование, сети Петри