

**IWEBSIM – СОВРЕМЕННАЯ ВЕБ-ТЕХНОЛОГИЯ
В ОБЛАСТИ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ
ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ¹**

А.Н. Балухто (Москва), Б.В. Соколов (Санкт-Петербург)

В настоящее время на практике в различных предметных областях создаются и широко используются сложные технические объекты (СТО), описываемые различными классами моделей сложных динамических систем (СДС), к числу которых можно, в первую очередь, отнести модели системной динамики, конечные автоматы, сети Петри, динамические модели выполнения комплексов операций и т.п. [1].

К настоящему времени в нашей стране и за рубежом разработаны многочисленные инструментальные средства и среды автоматизации аналитического и комплексного моделирования, среди которых следует указать GPSS, AnyLogic, BPsim, PowerSim, Simplex, Modul Vision, Triad.Net, CERT, ESimL, Simulab, NetStar, Pilgrim, МОСТ, КОГНИТРОН и т. д. [2]. Указанные средства в последнее время стали дополняться интеллектуальными информационными технологиями (нейросети, мультиагентные системы, нечеткая логика, технологии эволюционного моделирования и т. п.). Однако совместному использованию разрозненного набора этих инструментальных средств препятствует отсутствие общепринятых механизмов согласования используемых моделей в перечисленных средствах автоматизации моделирования как на программно-техническом, так и на глубоком семантическом уровне. Рассматриваемые вопросы являются основным предметом исследования интенсивно развиваемой в настоящее время теории комплексного (системного) моделирования (КМ), под которым в общем случае понимается методология и технологии полимодельного описания СДС, а также комбинированного использования методов, алгоритмов и методик многокритериального анализа, синтеза и выбора наиболее предпочтительных управленческих решений, связанных с созданием, использованием и развитием указанных систем в различных условиях динамически изменяющейся внешней и внутренней обстановок [1–4]. Комбинированное использование разнородных моделей, методов и алгоритмов позволяет взаимно компенсировать их объективно существующие недостатки и ограничения, одновременно усиливая их положительные качества.

В 2016 году вышла первая профессиональная версия программного комплекса iWebsim, предназначенного для комплексного моделирования СДС, полностью реализованного в виде веб-приложения на базе стандарта HTML 5.0 и JavaScript.

Данное приложение является кросс-платформенным приложением и имеет клиент-серверную архитектуру, в которой в качестве клиента выступает веб-браузер.

Появление iWebsim – закономерный результат развития современных веб-технологий, обеспечивающих производительность программ на JavaScript, приемлемую для решения широкого спектра различных задач комплексного моделирования СДС, и высокопроизводительную работу с графикой.

В настоящее время iWebsim является бесплатным общедоступным интернет-сервисом, развиваемым при информационной поддержке российского Национального общества комплексного моделирования.

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00199).

Общий подход к комплексному моделированию сложных динамических систем, реализованный в iWebsim

В iWebsim реализована методология комплексного моделирования динамических систем, основанная на комбинированном использовании различных методов и подходов к моделированию дискретных, непрерывных и гибридных систем. В основу предлагаемой программной платформы положена новая модификация ранее разработанной вычислительной G-модели, представляющая собой динамический альтернативный системный граф с перестраиваемой структурой, который построен на основе объединения математического аппарата сетей Петри с логико-динамическими моделями программного управления движением, каналами, ресурсами, комплексами операций, потоками и структурами группировок активных подвижных объектов [1,4]. Одно из основных достоинств разработанной комбинированной модели состоит в том, что она обеспечивает на концептуальном, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях детализации корректное согласование (в соответствии с критериями гомоморфизма отношений) математических (аналитико-имитационных) моделей управления структурной динамикой сложных динамических объектов с их логико-алгебраическими и логико-лингвистическими аналогами (моделями), построенными на основе интеллектуальных информационных технологий. При этом в отличие от существующих поведенческих (сценарных) моделей СТО, базирующихся на конечно-автоматных и имитационных описаниях, предложенный логико-динамический подход позволяет на конструктивном уровне решать не только задачи многовариантного упреждающего прогнозирования поведения СТО, но и задачи оперативного структурно-функционального синтеза облика СТО и СУ ими.

Пользователям iWebsim предоставляется набор различных инструментальных средств, реализующих указанный выше подход к комплексному моделированию динамических систем, в том числе:

- инструментарий для моделирования поведения во времени совокупностей («популяций») динамических объектов, способных к взаимодействию между собой и с внешней средой;
- диаграммы состояний (реализуются в соответствии со спецификацией UML) – средство моделирования динамических систем, основанное на теории автоматов;
- инструментарий для разработки имитационных моделей дискретных динамических систем, основанный на теории сетей Петри [5,6];
- инструментарий для моделирования динамических систем, в которых реализуются процессы транспортировки, хранения, обработки и распределения жидкостей, газов, сыпучих и др. веществ, образующих в системе непрерывные или непрерывно-дискретные потоки;
- инструментарий для моделирования динамических систем, основанный на использовании методологии системной динамики, предложенной Дж. Форрестером [7].

Кроме того, пользователю предоставляются широкие возможности по использованию своих скриптов и функций на JavaScript, что позволяет существенно расширить функциональные возможности iWebsim.

При этом важно отметить, что при моделировании конкретной системы все указанные выше инструментальные средства могут использоваться в комплексе. Например, диаграмма состояний может использоваться совместно с моделями «системной динамики», а инструментарий моделирования «популяций» динамических объектов – совместно с инструментами моделирования дискретных процессов.

Математические модели динамических систем в iWebsim представляются в графическом параметризованном виде. Пользовательский интерфейс графического редактора, с помощью которого осуществляется разработка указанных моделей, приведен на рис. 1.

С использованием такого рода моделей пользователь может проводить различные имитационные эксперименты, включая статистические, оптимизационные и другие.

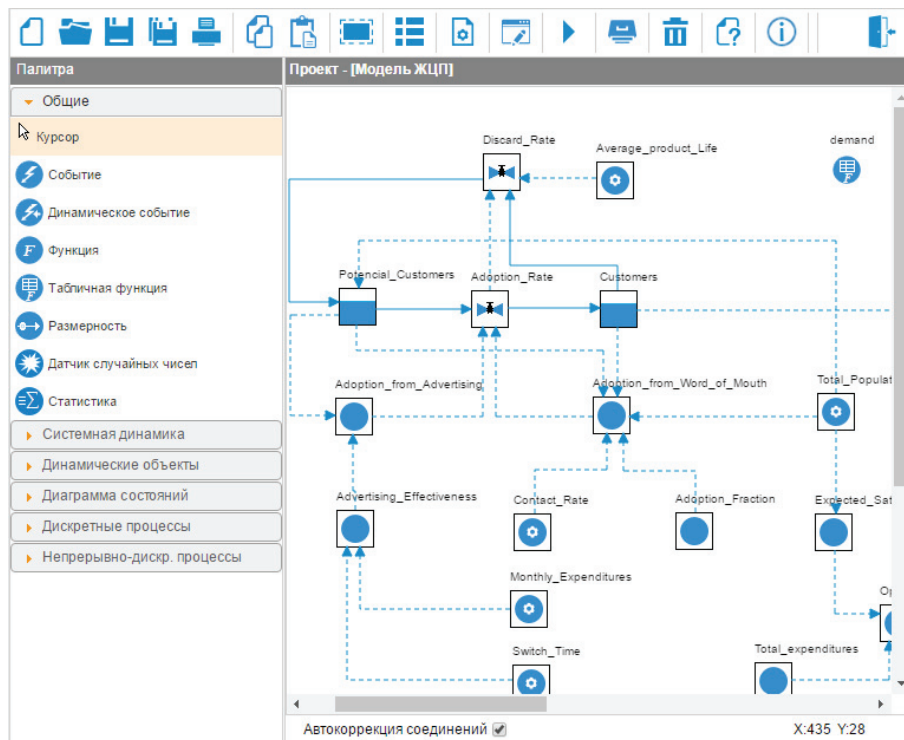


Рис. 1. Общий вид графического редактора моделей iWebsim (с примером модели динамической системы)

К важнейшим компонентам современных систем комплексного моделирования динамических систем относятся средства графической визуализации объектов моделируемых систем и процессов их функционирования. Для создания такого рода графических представлений в iWebsim реализован специальный графический редактор, общий вид которого (с примером графического представления моделируемой системы) приведен на рис. 2.

В рамках данного графического редактора пользователь имеет возможность использовать не только типовые графические примитивы (примитивы типа рамка, эллипс, ломаная линия, кривая и т.д.), но также диаграммы, индикаторы, графики, ГИС-карты и любые изображения, консолидируемые пользователем в рамках своей коллекции изображений.

Программа iWebsim предоставляет пользователю достаточно широкие возможности по использованию ГИС-технологий при моделировании динамических систем. В текущей версии iWebsim доступна тайловая карта OpenStreetMap. При этом пользователю предоставляется возможность подключить любой внешний сервер ГИС-маршрутизации, поддерживающий OSRM API.

В iWebsim для работы с ГИС-картой используется специальный редактор (рис. 3), с помощью которого пользователь имеет возможность добавлять на ГИС-карту свои объекты, включаемые в коллекции динамических объектов для ГИС-карты (статические объекты рассматриваются как частный случай динамических объектов).

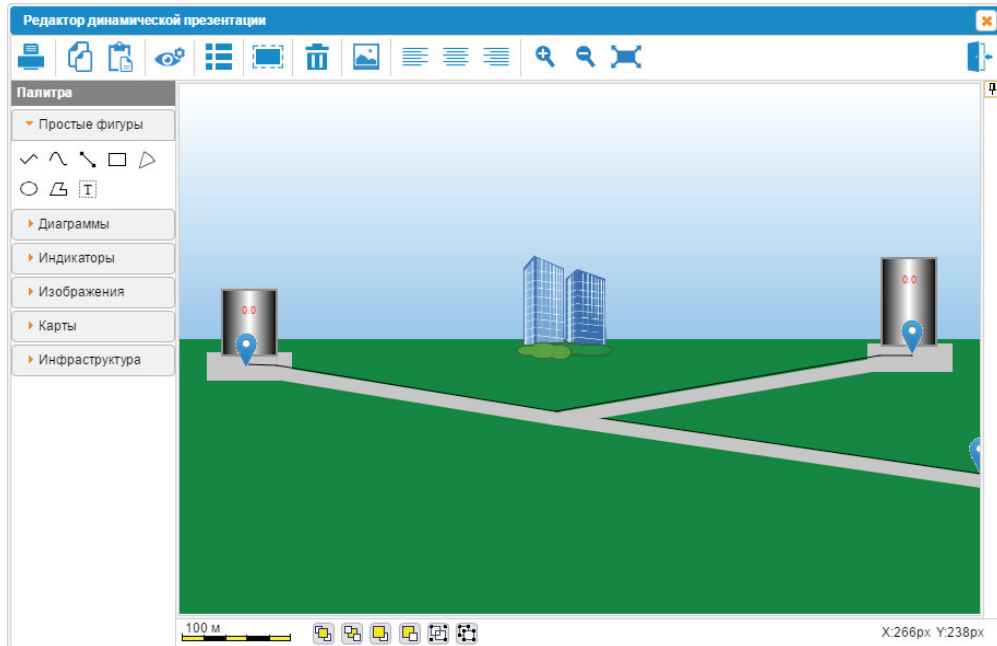


Рис. 2. Редактор динамической презентации имитационной модели

Дальнейшее развитие iWebsim планируется по следующим основным направлениям:

- реализация технологии 3D-визуализации;
- развитие специализированных библиотек графических объектов, позволяющих существенно упростить процесс разработки графических представлений моделируемых систем и процессов их функционирования.

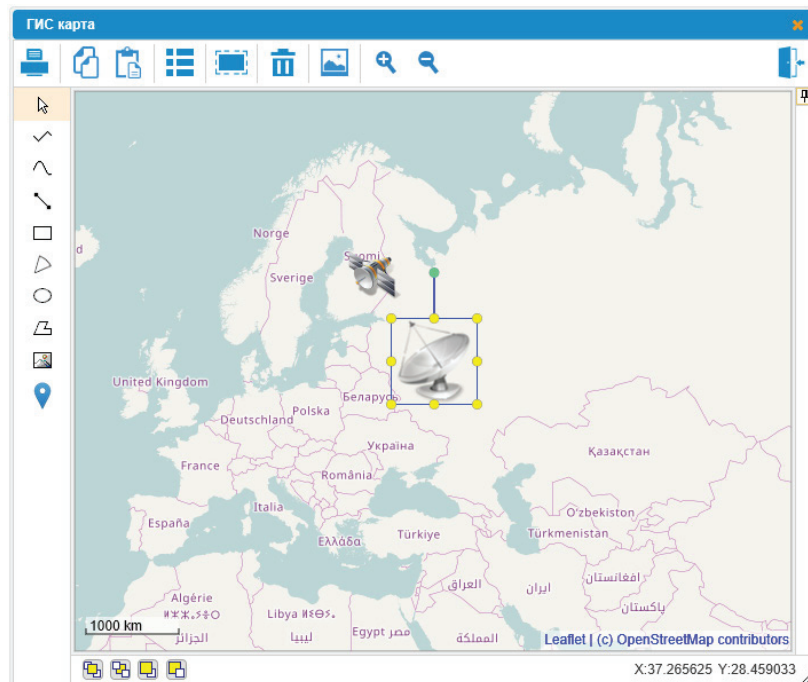


Рис. 3. Редактор ГИС-карты

Имитационное моделирование дискретных динамических систем

В iWebsim для моделирования процессов функционирования дискретных динамических систем используется небольшой, но весьма эффективный набор типовых элементов, базирующийся на следующих основных положениях (декларациях) относительно моделирования указанных процессов:

1. В качестве базовых понятий используются понятия «действие» (некоторая операция, работа или задача) и «событие». Полагается, что событие всегда происходит мгновенно, а действие может быть протяженным во времени и для его реализации могут потребоваться некоторые ресурсы.

2. Событие связывается всегда с наступлением условий, необходимых и достаточных для выполнения тех или иных действий, реализуемых в моделируемой системе, или завершением указанных действий, а действие – с выполнением некоторой операции, работы или задачи.

3. Действие может иметь различные исходы его реализации, при этом каждый из исходов действия интерпретируется как некоторое событие.

4. Длительность и исход выполнения действия могут носить случайный характер.

5. Если в один и тот же момент времени может произойти несколько событий одновременно, то их наступление осуществляется в порядке убывания их приоритета.

6. В графической модели процесса функционирования дискретной динамической системы любое событие может быть связано входными или выходными дугами только с действиями, а действие – только с событиями.

7. Простаивание свободного ресурса моделируемой системы или ожидание некоторого ее динамического объекта (например, документа, изделия, клиента и т.п.) начала выполнения той или иной операции (работы) рассматривается как некоторое пассивное действие, т.е. как частный случай общего понятия действия.

Таким образом, в рамках реализованного в iWebsim подхода к моделированию дискретных динамических систем процесс функционирования любой такой системы представляет собой упорядоченный во времени процесс выполнения реализуемых в ней действий и событий – завершение действия создает необходимые условия для наступления некоторого события, наступление которого, в свою очередь, создает необходимые условия для начала выполнения других действий и т.д.

Для моделирования процессов функционирования дискретных динамических систем в iWebsim вводится также специальный тип динамических объектов, именуемых *транзактами*.

В качестве таких объектов могут, например, выступать заявки, транспортные средства, обслуживающие устройства, люди и т.д.

К каждому транзакту может быть, при необходимости, привязан любой другой внешний динамический объект. В этом случае транзакт выступает в качестве носителя внешнего динамического объекта.

В iWebsim основу математического аппарата моделирования дискретных систем составляет формальный аппарат сетей Петри. В конечном счете, модель дискретной системы, созданной в iWebsim, транслируется в модифицированную временную сеть Петри с ингибиторными дугами и приоритетами [9–10], с помощью которой собственно и осуществляются необходимые имитационные эксперименты.

В состав типовых элементов, которые могут использоваться при моделировании процессов функционирования дискретных динамических систем, входят: задержка, событие, очередь, ресурс, генератор, терминатор, брокер (посредник).

Каждый из указанных выше элементов имеет свой набор параметров (свойств), задаваемых с помощью соответствующих диалоговых окон.

В моделях дискретных процессов могут использоваться связи двух типов: потоковая и ингибиторная.

Потоковая связь (отображается непрерывной стрелкой) указывает направление перемещения транзактов из одного элемента модели в другой.

Ингибиторная связь (отображается штриховой стрелкой) обеспечивает проверку отсутствия транзактов во входном ее элементе (реализует проверку на ноль).

На рис. 4 приведен пример графического образа модели дискретной динамической системы, в качестве которой выступает многоканальная система массового обслуживания с ограниченной очередью.

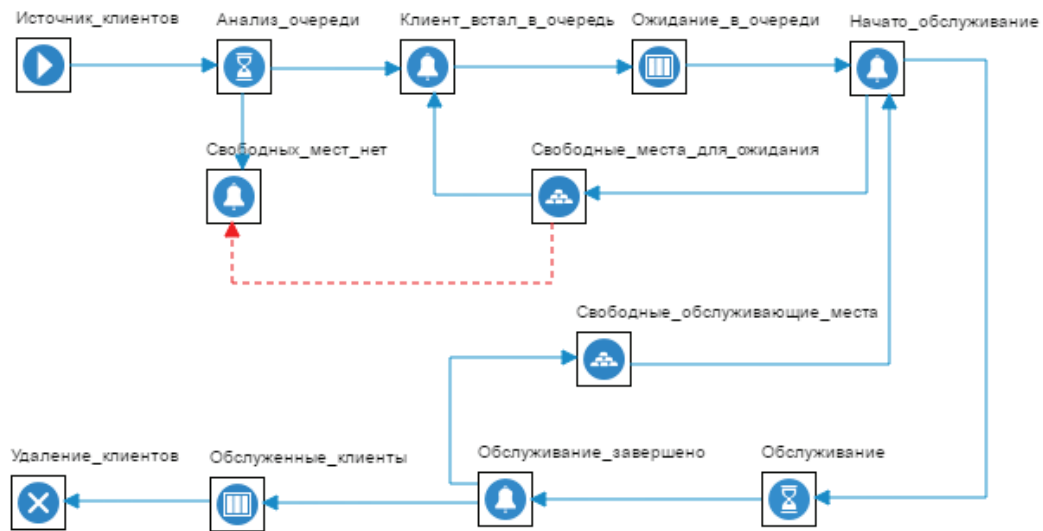


Рис. 4. Пример графического образа модели дискретной динамической системы

В свойствах элементов дискретной динамической модели могут задаваться скрипты (программный код на JavaScript), реализующие различные действия в определенные моменты времени или определяющие выполнимость некоторых условий, необходимых для реализации тех или иных событий.

Каждый типовой элемент модели дискретной динамической системы, а также каждый транзакт, создаваемый в процессе ее моделирования, имеет свой набор методов, доступных из любого скрипта модели.

Управление перемещением транзактов между элементами модели дискретной динамической системы осуществляется с помощью правил маршрутизации, задаваемых для каждого события такой модели.

Для связи элементов, используемых для моделирования дискретных процессов функционирования динамических систем, с элементами, используемыми для моделирования непрерывных (непрерывно-дискретных) процессов, используется специальный элемент, именуемый «брокером».

Поскольку в основе используемого в iWebsim подхода к моделированию дискретных динамических систем лежит применение формального аппарата сетей Петри, то данный подход позволяет решать также различные задачи верификации дискретных систем, традиционно решаемые с помощью сетей Петри, но уже в вероятностной форме. Например, задача достижимости заданной разметки сети Петри в iWebsim может интерпретироваться (в вероятностной форме) как задача оценки вероятности достижения системой заданного

ее состояния на заданном временном интервале, а задача живости – как задача оценки вероятности реализации в процессе функционирования системы заданного события на заданном временном интервале.

Сложные логико-динамические объекты

В iWebsim под сложным логико-динамическим объектом понимается любой объект, состояние которого может изменяться во времени, в том числе при воздействии на него других динамических объектов. Такого рода объекты в направлении комплексного моделирования, получившего название «агентное моделирование», именуются также агентами. Динамические объекты одного и того же типа объединяются в iWebsim в коллекции, являющиеся аналогами так называемых «популяций агентов» в агентном моделировании.

Для работы с динамическими объектами в iWebsim используются следующие типовые элементы: тип динамических объектов, коллекция динамических объектов, коллекция динамических объектов для ГИС карты.

Тип динамических объектов определяет:

- перечень всех параметров объектов данного типа и значения их по умолчанию;
- дополнительные методы объектов данного типа;
- код JavaScript, выполняемый на каждом шаге моделирования всего жизненного цикла объектов данного типа;
- графическое представление объектов данного типа по умолчанию;
- параметры пространственного движения объектов данного типа по умолчанию;
- единицы измерения координат для объектов данного типа.

Дополнительные методы динамического объекта могут быть двух типов: обычные методы и интеграторы.

Интеграторы обеспечивают решение дифференциальных уравнений, привязанных к объекту, и задаются выражением подынтегральной функции и начальным значением. Такого рода интеграторы могут, например, использоваться для задания модели пространственного движения объекта.

Динамические объекты одного и того же типа объединяются в коллекции (может создаваться произвольное число коллекций однотипных объектов).

Динамические объекты имеют широкий спектр методов, позволяющие управлять (с помощью соответствующих скриптов на JavaScript) их свойствами, движением в пространстве и взаимодействием с другими объектами.

В iWebsim любой динамический объект может быть «погружен» в дискретную модель динамической системы путем привязки его к соответствующему транзакту.

Диаграмма состояний

Диаграмма состояний в iWebsim реализуется в соответствии со спецификацией UML и предназначена в основном для управления состоянием модели в целом.

Для управления состоянием динамических объектов используется библиотека элементов, предназначенная для моделирования дискретных динамических систем.

Пример графического представления диаграммы состояний, создаваемой в рамках iWebsim, приведен на рис. 5.

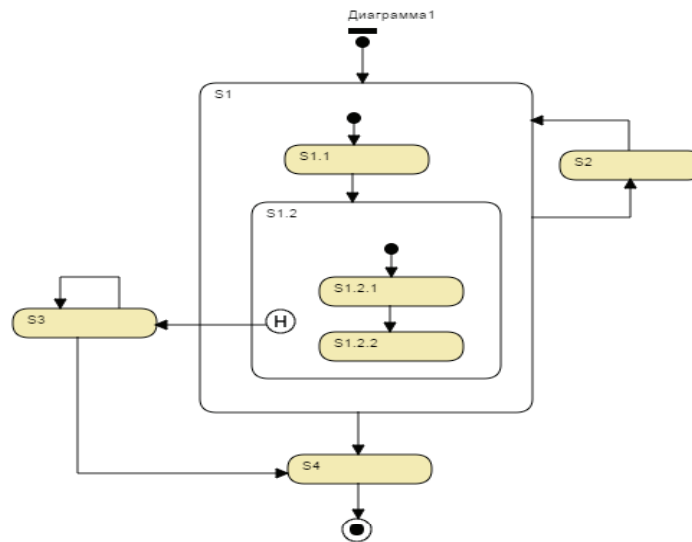


Рис. 5. Пример диаграммы состояний, создаваемой в iWebsim

Комплексное моделирование непрерывных и непрерывно-дискретных динамических систем

Моделирование непрерывных и непрерывно-дискретных систем может осуществляться с использованием элементов библиотеки, реализующей методологию системной динамики, предложенную Дж. Форрестером, а также элементов библиотеки, обеспечивающих моделирование систем с непрерывными или непрерывно-дискретными потоками веществ. В качестве таких потоков могут выступать потоки жидкостей, газов, сыпучих веществ, а также потоки дискретных динамических объектов в случаях, когда нет необходимости в моделировании каждого отдельного такого объекта.

Для управления дискретными состояниями моделей такого рода систем (если такие состояния имеются) может использоваться диаграмма состояний или модель дискретного поведения моделируемой системы, основанная на подходе, изложенном выше.

В качестве типовых элементов модели, создаваемой на основе методологии системной динамики, выступают: накопитель, поток, динамическая переменная, параметр, копия переменной.

Пример модели, созданной с использованием указанных выше элементов, приведен на рис. 6 (модель развития эпидемии).

Одними из основных элементов моделей системной динамики являются накопители и потоки. Накопители используются для представления объектов реального мира, в которых накапливаются некоторые ресурсы (деньги, люди, различные материальные ресурсы и т.п.). Значения накопителей в текущий момент времени определяют текущее состояние моделируемой системы, которое изменяется во времени в соответствии с характеристиками входных и выходных потоков накопителей.

С математической точки зрения накопитель совместно с входными и выходными его потоками задает некоторое дифференциальное уравнение, являющееся элементом математической модели исследуемой динамической системы.

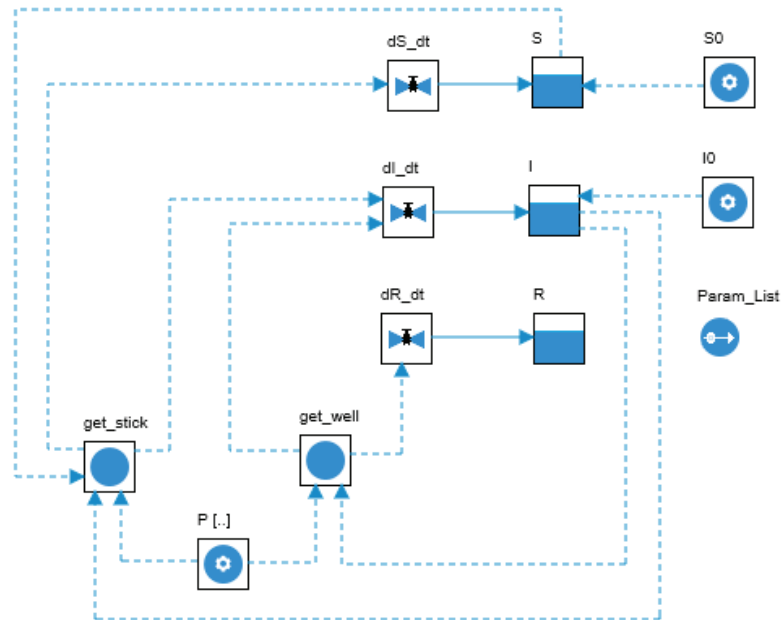


Рис. 6. Пример модели, созданной в iWebsim с использованием библиотеки элементов системной динамики

Использование в модели динамических переменных позволяет сделать графическую модель более удобной для ее понимания и зрительного восприятия пользователем, а также расширить ее возможности с точки зрения анализа результатов моделирования и проведения различных имитационных экспериментов.

В состав типовых элементов, используемых для моделирования непрерывных (непрерывно-дискретных) потоков, входят: источник, поглотитель, резервуар, труба, процессор, конвейер, вентиль, объединитель, разветвитель, преобразователь.

Взаимодействие перечисленных типовых элементов с другими типовыми элементами модели может осуществляться на уровне реализуемых в них различных скриптов, а также с помощью других механизмов, реализуемых в iWebsim, в частности, с помощью специального типового элемента – брокера (посредника).

Заключение

iWebsim представляет собой кросс-платформенное веб-приложение, предоставляющее пользователям среду для разработки аналитико-имитационных моделей сложных логико-динамических систем и проведения на их основе различных экспериментов, связанных с решением не только задач многовариантного упреждающего прогнозирования поведения СТО, но и задач оперативного структурно-функционального синтеза облика СТО и СУ ими.

В iWebsim реализована методология комплексного моделирования динамических систем, основанная на комбинированном использовании различных методов и подходов к имитационному моделированию дискретных, непрерывных и гибридных систем.

Реализация iWebsim в виде кросс-платформенного веб-приложения дает возможность пользователям в любое время, в любом месте, где есть доступ к сети Интернет, осуществлять имитационное моделирование различных динамических систем (в том числе с использованием обычных планшетных компьютеров). Для этого достаточно на компьютере пользователя иметь современный веб-браузер, поддерживающий стандарт HTML 5.

Планируемая в следующей версии iWebsim реализация технологии 3D-визуализации, а также дальнейшее развитие специализированных библиотек графических объектов позволит существенно расширить функциональные возможности данного программного продукта в части решения не только задач анализа поведения СТО, но и выбора их поведения.

Литература

1. **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
2. Материалы всероссийских научно-практических конференций “Имитационное моделирование. Теория и практика”. СПб.: ФГУП “ЦНИИ технологии судостроения”, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015 (www.simulation.su).
3. **Аврамчук Е.Ф., Вавилов А.А., Емельянов С.В.** и др. Технология системного моделирования / Под общ. ред. С.В. Емельянова. М.: Машиностроение, 1988.
4. **Охтилев М.Ю., Павлов А.Н., Плотников А.М., Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Комплексное моделирование сложных объектов: основные особенности и примеры практической реализации // Седьмая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015): Труды конф., 21-23 окт. 2015 г., Москва: в 2 т./ Ин-т проблем упр. им.В.А. Трапезникова Рос. Акад. наук; под общ. ред. С.Н.Васильева, Р.М.Юсупова. Т.1. Пленарные доклады. М.: ИПУ РАН, 2015. С.58–81.
5. **Котов В.Е.** Сети Петри. М.: Наука, 1984.
6. **Питерсон Дж.** Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984.
7. **Forrester, Jay W.** (1961). Industrial Dynamics. MIT Press. ISBN 0-262-06003-5.
8. **Балухто А.Н., Карпов С.Н.** Имитационное моделирование бизнес-процессов в среде IMDIS. М.: МАТИ, 2009. 160 с.
9. **Balukhto A.N.** Modified Time Petri Nets and Simulation Automation of Discrete Flow Systems // AUTOMATION AND REMOTE CONTROL C/C OF AVTOMATIKA I TELEMEXHANIKA; 57, 8; 1173-1180; 1997.