

## ИНФОРМАТИКА ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.434:004.94:004.7

### Выбор среды имитационного моделирования информационно-управляющих сетей

С. А. Даденков, Е. Л. Кон

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29  
dadankov@rambler.ru; +7-(909)-112-80-03

Выполняется анализ программных сред имитационного моделирования информационно-управляющих сетей, составляющих их шин данных и коммуникационных стеков протоколов. Производится анализ сред моделирования универсального и общецелевого, специализированного назначения, по выделенным общим и частным, для анализируемого класса сетей, критериям. В результате работы выбрана эффективная среда общецелевого имитационного моделирования AnyLogic, характеризующаяся наибольшей эффективностью применительно к созданию и анализу новых корректных моделей исследуемых информационно-управляющих сетей.

**Ключевые слова:** *имитационное моделирование; характеристики программных сред моделирования; дискретно-событийное моделирование; информационно-управляющие сети; шины данных.*

DOI: 10.17072/1993-0550-2019-1-58-69

#### Введение

Современные распределенные автоматизированные системы управления (АСУ) должны характеризоваться эффективностью производственных процессов, обеспечивать необходимое качество и количество выпускаемой продукции. Это требует обеспечения своевременности и качества управления технологическими процессами. Наряду с традиционными для АСУ параметрами, качество в распределенных системах существенно определяется процедурами сбора, обработки и передачи технологической информации, вносящими в процесс управления случайное информационное запаздывание. Таким образом, важным является организация информационного и технического обеспечения автоматизированных системы управления, удовлетворя-

ющего требованиям качества управления по запаздыванию (задержкам). Поэтому актуально проектирование лежащих в основе АСУ информационно-управляющих сетей (ИУС) с требуемыми временными характеристиками передачи и обработки технологической информации.

Решение поставленной задачи выполняется во многих работах, в том числе для анализируемой авторами информационно-управляющей сети на основе fieldbus-шины LonWorks [1–5]. Многофакторные задачи оценки и обеспечения вероятностных и временных характеристик обработки технологической информации решаются как с использованием аналитических, так и имитационных способов. При этом основным возможным методом исследования многомерной распределенной сети является ее декомпозиция и независимый анализ составляющих ее подсистем генерации, обработки и передачи ин-

формации. Проблема такого подхода заключается в предположении о статистической независимости параметров и характеристик подсистем информационно-управляющих сетей при их анализе и проектировании. Решение проблемы состоит в построении и анализе целостной адекватной модели ИУС. При этом требуется выбор эффективных сред имитационного моделирования (СИМ), позволяющих решать поставленные в работе задачи.

Выбор среды моделирования не может быть полностью основан на результатах полученных в известных публикациях [6–13]. Это объясняется необходимостью анализа СИМ не только по общим для систем моделирования критериям, но и частным, для анализируемого класса информационно-управляющих сетей на основе шин данных со случайным алгоритмом доступа CSMA, в частности сети LonWorks. Для достижения поставленной цели материал в работе представлен следующим образом. Вначале осуществляется выбор и представление краткой характеристики распространенных средств моделирования, как общего, так и специализированного назначения. Далее, в работе представляется и используется система оценки анализируемых СИМ по множеству критериев, состав и приоритеты которых определены в соответствии с областью исследования и целями моделирования [8–15]. Результаты анализа позволяют выбрать эффективную среду моделирования информационно-управляющих сетей.

## **2. Краткая характеристика анализируемых сред моделирования**

Выбор эффективной среды моделирования объекта требует анализа распространенных в России и за рубежом систем на основе дискретно-событийного метода моделирования [6–8]. Выбор дискретно-событийного моделирования обусловлен возможностью точного описания принципов функционирования и поведения объекта исследования.

Системы имитационного моделирования могут быть подразделены по критерию их специализированности по отношению к анализируемому объекту и предмету исследования. Принято выделять три группы систем моделирования: универсальные языки объектно-ориентированного программирования (УООП), общецелевые (ОСИМ), специализированные (ССИМ). К универсальным систе-

мам программирования относятся "языковые" среды разработки моделей Си, Java, характеризующиеся отсутствием методов моделирования исследуемого объекта (низкоуровневое моделирование). Программная модель системы представляет собой циклическую структуру, моделирующую время, в рамках которой процессы генерации, обслуживания, передачи информационных сообщений представляются работой (изменением значений) большого числа переменных, значений массивов данных, объектов. Общецелевые системы отличаются наличием развитых методов и подходов дискретно-событийного моделирования. Модель представляется совокупностью элементов систем массового обслуживания, воспроизводящих процессы (задержка, занятие, освобождение ресурса и др.) работы с информационными сообщениями (пакетами) в системе. Это определяет отсутствие необходимости разработки низкоуровневых служебных процедур управления временем моделирования, продвижения и синхронизации происходящих событий. В сравнении с УООП это значительно уменьшает сложность и продолжительность разработки модели. В работе анализируются распространенные ОСИМ: GPSS, MatLab, Arena, AnyLogic. Специализированные системы моделирования отличаются наличием встроенных библиотек протоколов, модулей сетевых элементов (терминалов, сенсорных узлов, серверов, коммуникационного оборудования) и методов работы с ними (взаимодействия, генерации, обмена и обслуживания информации), что уменьшает продолжительность разработки и обеспечивает корректность результатов моделирования. ССИМ используются для решения задач планирования сетей, выполняемых путем оценки и сравнительного анализа нескольких возможных вариантов их архитектур. В составе группы ССИМ анализируются Opnet (Riverbed) и Network Simulator (NS-2(3)).

## **3. Критерии оценки систем имитационного моделирования**

Многообразие применяемых на практике и анализируемых в работе систем имитационного моделирования обусловлено их различной эффективностью реализации этапов работы с моделями: планирования, разработки и эксплуатации (исследования). Выбор эффективной СИМ требует создания системы

критериев и оценки сред моделирования. Для оценки систем моделирования выделены общие и частные, для распределенных информационно-управляющих систем – критерии [11–13].

Одной из наиболее важных характеристик СИМ является возможность решения поставленных задач моделирования. Система моделирования должна удовлетворять возможностям решения задач:

- анализа, предполагающего выполнение количественной оценки вероятностных и временных характеристик сети;
- исследования, выполняемого путем проведения экспериментов варьирования параметров в широких диапазонах и анализа характеристик;
- планирования, предполагающего выбор и оптимизацию параметров сети;
- изучения технологии функционирования сети, предполагающего возможность получения знаний в области принципов функционирования fieldbus-систем при разработке модели, умений и навыков моделирования.

Система моделирования как программное обеспечение должна удовлетворять общим требованиям: доступности для некоммерческого использования, кросс-платформенности, возможности разработки отдельного приложения-модели.

Важным при оценке является анализ СИМ по критериям, характеризующим сложность разработки модели. Необходим анализ адекватности [8, 15] реализаций СИМ подходов дискретно-событийного моделирования, определяющих корректность результатов. Сложность и трудоемкость (временные затраты) разработки модели необходимо выполнять по критериям: возможность графической разработки (визуальный конструктор, блочное моделирование), сложность программирования, наличие средств верификации (отладки) модели, открытость и документированность системы, ресурсоемкость (требования и эффективность использования аппаратных ресурсов вычислительной системы). Гибкость разработки (модернизации) сложной модели можно оценить по реализуемым СИМ подходам моделирования: объектное, процессное, агентное [16]. Сложность масштабирования модели для решения задач исследования и планирования сети можно оценить поддержкой режимов масштабирования: ручное, про-

граммное. Дополнительные требования могут предъявляться к визуализации процесса функционирования модели, а также полноте собираемой статистики (для ССИМ).

Частными (для исследуемых в работе сетей на основе fieldbus-технологий) являются критерии, определяющие возможность моделирования узлов и коммуникационного оборудования сети, принципов ее функционирования, протоколов доступа и передачи технологической информации с использованием существующих библиотек и модулей элементов системы.

Требуется выполнение анализа целесообразности применения СИМ в образовательном процессе для получения обучающимися знаний в области функционирования и планирования промышленных и сенсорных сетей, получения умений и навыков моделирования и анализа моделей сложных систем. Необходима оценка систем по следующим критериям: сложность и эффективность обучения, перспектива применения полученных знаний и умений на практике.

#### 4. Анализ систем моделирования

Анализ сложности этапов моделирования сложных систем в анализируемых средах разработки целесообразно производить по критерию возможности организации имитационных экспериментов: оценка ВВХ информационно-управляющей сети; варьирование параметров модели и анализ динамики изменения характеристик; оптимизация сетевых характеристик. Системы низкоуровневого моделирования не поддерживают готовых решений по организации экспериментов и требуют сложной индивидуальной программной реализации экспериментов для каждой модели. Системы общецелевого моделирования основаны на организации дискретно-событийного моделирования и поддерживают методы проведения простых экспериментов (прогонов) оценки характеристик модели. При этом эксперименты варьирования и оптимизации параметров проработаны в системах GPSS, Arena, AnyLogic. Результатом таких экспериментов могут являться как численные (табличные) данные, так и графики изменения характеристик модели. MatLab характеризуется отсутствием варьирования и оптимизации параметров и требует "ручного" проведения большого числа простых экспериментов,

с последующей систематизацией и анализом результатов. Ограниченно эксперимент варьирования поддерживается системой GPSS и заключается в использовании специальных языковых структур в модели, определяющих последовательный программный запуск модели с заданными значениями параметров. Данный подход мало удобен ввиду сложности моделирования, заключающейся в необходимости изменения исходных параметров в широких диапазонах. Полученные результаты требуют дальнейшей обработки в сторонних приложениях. Инструмент AnyLogic предлагает организацию экспериментов варьирования параметров с графическим отображением результатов в виде гистограмм и графиков, что способствует пониманию результатов и характеризует эффективность исследования. Оптимизационный потенциал GPSS, по сравнению с системами Arena, AnyLogic, позволяет решать наиболее простые задачи перебора и выбора параметров, оптимальных по значению целевой переменной. Arena и AnyLogic содержат мощный инструмент оптимизации optQuest, позволяющий быстро и точно осуществлять оптимизацию параметров модели по задаваемой целевой функции, в частности максимизируя/минимизируя характеристики сети. Специализированные системы моделирования, как правило, не содержат инструментов создания экспериментов варьирования параметров и предполагают их выполнение в индивидуальном порядке путем последовательного выполнения отдельных экспериментов оценки. Инструмент оптимизации Ornet основан на переборе ограниченного числа протокольных параметров и обеспечивает оптимизацию только по ограниченному числу предопределенных в системе характеристик. Данное ограничение в совокупности с закрытостью моделей протоколов не позволяет выполнять полноценное исследование и оптимизацию характеристик исследуемой сети.

Оценка характеристик СИМ как программного обеспечения. Каждая из рассматриваемых сред моделирования характеризуется доступностью (бесплатностью) версий для проводимых некоммерческих исследований. Недостатком используемых условно бесплатных версий является ряд свойственных им ограничений. Функциональность специализированной системы Ornet ограничена использованием ряда библиотек моделей системных

элементов и протоколов в рамках распространяемого пакета Ornet IT Guru Academic Edition. Среда разработки на Си, Java находится в бесплатном доступе и применении. Остальные системы характеризуются приемлемыми ограничениями, касающимися количества графических элементов (блоков) и объема программного кода в модели. Выбору СИМ должна предшествовать оценка кроссплатформенности системы моделирования, определяющая возможность работы с моделью более чем на одной аппаратной платформе и операционной системе. СИМ Си, Java, AnyLogic, MatLab, NS-2 поддерживают работу под управлением распространенных операционных систем (ОС) типа Windows, Unix, Mac. Системы Ornet, Arena, GPSS работают под управлением только ОС семейства Windows.

Адекватность СИМ определяется корректностью реализации заложенных в нее инструкций, процедур, событий, процессов и других примитивов и операторов моделирования. Оценке адекватности СИМ посвящено большое количество трудов, в частности распространенные работы сравнительного анализа результатов СИМ [8]. Известные результаты свидетельствуют об адекватности анализируемых СИМ. Однако известно и широкое обсуждение проблем адекватности системы GPSS, связанное с использованием генераторов случайных чисел, их сочетаний, что может привести к значительному уменьшению точности получаемых результатов. Обеспечение адекватности УООП является еще более сложной задачей, поскольку дополнительно требует от разработчика навыков корректной разработки процесса моделирования. Таким образом, вероятность допущения ошибки, приводящей к нарушению адекватности моделируемой сети, для таких сред гораздо выше, чем для общецелевых и специализированных.

Сложность и трудоемкость разработки модели может быть оценена путем анализа процесса построения модели, который реализуется следующими способами: составлением программного кода, визуальным конструктором. Программирование модели с помощью УООП Си, Java характеризуется высокой трудоемкостью и сложностью, что определяется необходимостью программирования "физики" дискретно-событийного моделирования (механизмов изменения модельного времени,

продвижения заявок, организации и синхронизации списка событий), программирования логической структуры модели путем создания и работы с множеством переменных, массивов, объектов и других элементов хранения данных о моделируемых процессах в системе. Пакеты визуального моделирования Arena, AnyLogic, Ornet, MatLab, NS-2 позволяют пользователю вводить описание моделируемой системы преимущественно в графической форме, дополняя ее необходимыми программными участками кода. Это способствует быстрому и корректному построению модели, что обусловлено сокращением количества создаваемых логических ошибок по сравнению с кодовой разработкой. Простота программирования в системах ОСИМ AnyLogic, Arena, MatLab характеризуется необходимостью неглубоких локальных знаний процедурного и объектного программирования, умений построения элементарных циклических, условных и других программных структур. Программирование в ССИМ Ornet и NS-2 требует глубоких знаний языка программирования C++ для моделирования новых моделей, модификации алгоритмов, протоколов, оборудования.

Важным инструментом в ходе разработки модели является наличие встроенных в СИМ средств отладки модели: поиска и устранения ошибок. Каждая из систем моделирования характеризуется наличием синтаксического механизма поиска ошибок в программном коде модели. Поиск логических ошибок в модели довольно сложен и связан для всех систем с трассировкой (пошаговым выполнением событий в модели) и анализом значений большого числа переменных, объектов, структур. Для систем Arena, AnyLogic с использованием визуального конструктора, механизма визуализации данных и процесса функционирования модели поиск логических ошибок занимает меньший объем времени при разработке. Определение некорректно настроенной логики взаимодействия узлов, выбранных параметров функционирования в модели ССИМ без необходимого опыта и понимания результатов моделирования практически невозможно.

Открытость кода и документированность библиотек системы является одним из важных свойств специализированных СИМ, но может рассматриваться и по отношению к универсальным и общецелевым системам.

Данное свойство определяет возможность модификации специально разработанных для систем библиотек моделей и элементов систем связи с целью сбора дополнительной статистики, определения дополнительных параметров модели и решения других исследовательских задач. Закрытость библиотек системы Ornet не позволяет модифицировать разработанные элементы модели, что определяет ее малую эффективность в области решения исследовательских и оптимизационных задач. Необходимость изменений приводит к разработке новых моделей, что характеризуется высокой сложностью и трудоемкостью программирования на языке C++. Все остальные исследовательские системы характеризуются открытостью исходного кода элементов моделей и/или возможностью его дополнения.

Дополнительным требованием в ходе разработки модели является представление визуализации процесса функционирования модели, а также результатов моделирования в форме диаграмм, графиков и таблиц, что упрощает их понимание исследователем. Недостаток систем GPSS, MatLab заключается в отсутствии возможностей визуализации работы модели. При этом системы обладают возможностью графического представления результатов в виде графиков. Системы низкого уровня программирования характеризуются наличием стандартных визуальных элементов и сложных подходов работы с ними, поддерживают простой вывод результатов в графической форме. В специализированных системах моделирования предусмотрены лишь стандартные для систем возможности визуализации, которые, как правило, отражают лишь общий процесс передачи пакетов по каналам связи, без возможности создания пользовательской анимации. Результаты моделирования могут быть представлены в графической форме.

Процесс разработки модели накладывает ряд технических ограничений на возможность ее дальнейшего применения, в частности, ввиду количества потребляемых при эксплуатации модели ресурсов вычислительной системы. Повышенное потребление ресурсов свойственно, как правило, низкоуровневым системам моделирования. Это объясняется неэффективностью программирования сложных моделей, которая может характеризоваться сложными механизмами воспроизведения

принципов дискретного моделирования, использованием избыточного количества элементов данных в модели, неэффективная работа с которыми может приводить к утечке вычислительных ресурсов. Общецелевые и специализированные системы характеризуются отсутствием проблем утечки ресурсов, связанной с моделированием. Однако свойственные им графические интерфейсы модели, визуализация элементов приводят к постоянно высокому потреблению вычислительных ресурсов.

Гибкость СИМ определяет простоту разработки и модификации модели, учета в ней необходимых факторов функционирования информационно-управляющей сети. Гибкость систем можно оценить исходя из подходов к моделированию, их преимуществ и недостатков. Стоит выделять следующие подходы: объектный, процессный, агентный.

*Объектный* подход представляет собой подход, основанный на ООП, когда модель представляется совокупностью объектов, массивов, переменных, а моделируемый процесс – изменением данных элементов. Данный подход можно характеризовать высокой гибкостью, т.е. возможностью реализации логики работы модели с объектами, процессами любой сложности. Отсутствие полноценного (без ограничений на параметры и методы обслуживающих/обслуживаемых объектов) объектного подхода в СИМ MatLab, GPSS приводит к ограничениям и сложности моделирования сложных динамических процессов, в частности, ряда дисциплин обслуживания, принципов работы с произвольными объектами (заявками) в определенный момент модельного времени. Решение проблемы осуществляется путем использования дополнительных громоздких программных структур [8]. Остальные общецелевые и специализированные СИМ основаны на полноценных языках ООП и поддерживают возможность применения объектного подхода по отношению к созданию классов моделируемых объектов: обслуживающих устройств, обслуживаемых пакетов и других элементов информационно-управляющих сетей.

В рамках общецелевых систем моделирования распространен *процессный* подход к разработке модели. В рамках подхода разрабатываемая модель представляет собой последовательность элементарных процессов массового обслуживания (постановка/выемка в

очередь, задержка обслуживания, перенаправление, прерывание, захват ресурса и др.). Данный подход является довольно гибким и позволяет моделировать любую обслуживаемую сеть или систему. Однако рост сложности моделируемых процессов, необходимость создания модели с динамически изменяемыми в ходе моделирования связями между объектами определяют снижение гибкости разработки моделей с использованием процессного подхода GPSS, MatLab, Opnet. Развитие процессного подхода продолжается в СИМ Agena, Anylogic, в частности объектизацией систем, характеризуемой реализацией большого числа новых гибких методов работы с элементами моделей, а также возможностью разработки пользовательских методов, что определяет высокую гибкость моделирования. Однако и данного развития процессного подхода СИМ становится недостаточно. Модель сложной системы представляет собой сотни и тысячи блоков и связей, составляющих процесс обслуживания. Построение такой модели с увеличением масштабов ее структуры в ходе разработки характеризуется экспоненциальным ростом трудоемкости. Это обуславливается необходимостью при добавлении каждого нового блока в модель, пересмотра логики работы ранее введенных в модель блоков, добавления (уточнения) и изменения принципов их функционирования, изменения структуры процесса.

Именно эти сложности определили начало развития нового гибкого подхода к моделированию, получившего название *агентного* моделирования. Подход основывается на выделении основных объектов модели (обслуживающих и обслуживаемых устройств). Разработка модели производится не созданием единой громоздкой схемы функционирования модели, что характерно для процессного моделирования, а декомпозицией моделируемого процесса по отдельным объектам модели, насыщение их индивидуальными принципами функционирования, реализация которых выполняется с помощью диаграмм состояний и переходов [8, 11, 12]. Такой подход отличается рядом преимуществ, основными из которых являются наглядное понимание структуры модели и моделируемых процессов, простота разработки модели. Простота заключается в отсутствии необходимости просмотра и редактирования всех

предшествующих процессов модели, не затрагиваемых (не вовлеченных в логику функционирования) в ходе текущей разработки логики функционирования объекта модели. Данный подход получает развитие в системе AnyLogic и обуславливает его наибольшую гибкость разработки сложных моделей [8].

Выделенные подходы разработки совместно с конструктором построения модели определяют характеристику масштабируемости модели в ходе ее эксплуатации при исследовании. Под масштабируемостью модели понимается возможность и сложность изменения масштаба структуры модели, изменения числа входящих в ее состав элементов при исследовании. Для информационно-управляющих сетей масштабирование связано с возможностью изменения архитектуры модели, количества узлов в сегментах шины данных. Анализируя СИМ, можно выделить два подхода к масштабированию модели: программное и ручное. Программное масштабирование позволяет изменять структуру модели непосредственно в ходе ее выполнения путем задания определенных исходных и управляющих данных. Программное масштабирование наиболее эффективно для проведения исследований, решения оптимизационных задач, и возможно в системах УООП, ОСИМ Anylogic, GPSS. Достигается путем доступа к исходным данным из конфигурационных файлов (текстовых, табличных, баз данных), а также программными методами динамического создания необходимых объектов как в начале, так и в процессе моделирования. Проблема масштабируемости, свойственная специализированным и общецелевым системам MatLab, Arena, заключается в статичном блочном процессе построения структуры модели. Это определяет практическую невозможность программного добавления элементов в модель в процессе моделирования. Такое масштабирование требует ручной коррекции структуры модели и осуществляется изменением (добавлением) блоков элементов системы – узлов и связей между ними в среде визуального моделирования. Это вносит значимые временные затраты на этапе эксплуатации модели при количественной оценке ВВХ ИУС, в ходе исследования и при проектировании сети.

Анализ возможности применения СИМ для моделирования информационно-управляющих сетей, построенных в частности на

основе шин данных с протоколами случайного множественного доступа CSMA (LonWorks), требует оценки наличия полноты специализированных модулей и библиотек моделей сетевых элементов (узлов, коммуникационного оборудования), алгоритмов и протоколов. Для моделирования анализируемых сетей, в частности LonWorks, необходимыми элементами библиотеки СИМ являются модели: проводных/беспроводных каналов связи физического уровня OSI; алгоритмов случайного доступа CSMA канального, особенностей адресации и передачи сетевого, транспортного и сеансового уровней; циклических дисциплин реализации приложения узла; структуры узлов, коммуникационного оборудования с принципами обслуживания неоднородных сообщений. В ходе анализа УООП и ОСИМ не выявлено известных общедоступных библиотек необходимых сетевых модулей, поэтому далее выполняется оценка специализированных систем Opnet и Network Simulator. Первичный анализ систем иллюстрирует отсутствие библиотек с необходимыми моделями коммуникационных стеков протоколов LonWorks, Industrial Ethernet, ModbusTCP, CAN и других сенсорных сетей со случайным доступом. В связи с этим разработка моделей возможна только в режиме модификации существующих моделей протоколов CSMA (Ethernet) с разработкой необходимых моделей узлов и алгоритмов обслуживания информационных сообщений. Существующей возможностью СИМ является моделирование стандартов физического уровня OSI 10BaseT, 100BaseT, 1000BaseX, Frame Relay (T1, E1, T3), PPP и др. Гибкая настройка линий связей в совокупности с универсальными элементами приемо-передающих устройств позволяет моделировать каналы обмена данными между узлами в ИУС.

Моделирование протоколов случайного доступа определяет необходимость наличия библиотек протоколов: unslotted и slotted CSMA/CD (IEEE 802.3, EIA 709) для моделирования Industrial Ethernet, ModbusTCP, LonWorks (predictive p-persistent CSMA); CSMA/CA (802.11, 802.15.4) для CAN, других сетей с беспроводной связью, в том числе моделирования сложных архитектур, включающих промежуточные сегменты сетей, например со шлюзованием по Wi-Fi. Результаты поддержки протоколов получены из докумен-

тации к СИМ, а также известных пользовательских библиотек модулей и отражены в оценочной таблице 1. Анализ необходимых протоколов сетевого, транспортного уровней OSI определяет возможность моделирования только широко распространенного стека протоколов TCP/IP, нашедшего применение в технологиях Ethernet, ModbusTCP и ряда других. Для моделирования сетей с иными протоколами сетевого, транспортного и сеансового уровня, например исследуемого LonWorks, необходима трудоемкая разработка модели коммуникационного стека протоколов, описывающая логику обработки объектов – информационных сообщений, формируемых, принимаемых и передаваемых узлами распределенной сети. Ввиду отсутствия библиотек сенсорных приложений моделирование принципов его функционирования (генерации и обработки измерительных и управляющих данных) должно производиться разработчиком с использованием диаграмм состояний и переходов (Opnet), сопровождаемых программированием логики (например, на языке C++). Таким образом, индивидуальное программирование большей части модели сети LonWorks и механизмов сбора статистики определяет трудоемкость процесса разработки модели не меньшую, чем при использовании общецелевых систем моделирования на базе процессного либо агентного подхода.

Анализ эффективности применения СИМ в сфере образования по направлению подготовки "Управление в технических системах". Возможность применения системы моделирования в процессе обучения специалистов определяет дополнительный ряд требований к выбору СИМ [17], в частности требования к уровню знаний и умений непрофильного для специальностей программирования и моделирования. При оценке применимости СИМ в образовании необходимо определить цели: изучение технологии, протоколов, принципов функционирования fieldbus-шин; изучение принципов дискретно-событийного моделирования на примере моделирования информационно-управляющих сетей. Таким образом, оценку СИМ необходимо проводить по критериям: сложность и эффективность обучения (получения знаний и умений), перспектива применения полученных знаний и умений на практике.

Сложность применения СИМ связана непосредственно с необходимым высоким уровнем знаний, умений в области программирования. Указанное свойственно УООП и ССИМ, характеризующимся преимущественно кодовой разработкой модели для достижения поставленных целей исследования. Системы визуальной разработки модели Agena, AnyLogic предъявляют базовые требования к знанию основ процедурного и объектно-ориентированного программирования. Разработка моделей в таких средах подразумевает создание лишь небольших участков вспомогательного программного кода, процедур и функций, что значительно снижает уровень сложности построения корректных моделей.

Эффективность применения СИМ в обучении определяется объемом и качеством получаемых знаний и умений моделирования за предусмотренное учебной программой время. При анализе эффективности стоит учитывать подход к моделированию. Системы с процессным подходом определяют необходимость планирования и разработки модели на основе полного объема знаний о сложном моделируемом процессе обработки и передачи информации в сети. Это предполагает необходимость проведения курса лекционных занятий, а после – выполнения практических (лабораторных) занятий. Такому процессу обучения характерны известные недостатки. Более эффективными следует считать средства объектного и агентного моделирования. Процесс построения структуры модели и составляющих ее объектов в таких средах может производиться по мере накопления знаний о моделируемом объекте. Данный подход более эффективно способствует усвоению получаемых знаний за счет возможности совмещения процесса получения и закрепления знаний на практике при разработке модели. Кроме этого, учебный процесс может и должен быть построен таким образом, чтобы модель разрабатывалась от простой, с учетом малого числа факторов функционирования моделируемой сети, к более сложной (большеразмерной), и соответственно, корректной. Оценка результатов моделирования в ходе процесса разработки модели позволяет организовать исследовательскую деятельность обучающегося, способствует наглядной оценке необходимости учета в моделях разнородных факторов функционирования ИУС для получения адекват-

ных оценок их характеристик. Данный подход определяет перспективность применения полученных знаний и умений в области проектирования информационно-управляющих сетей. Сложность и практическая нецелесообразность использования специализированных сред моделирования в рамках анализируемого учебного процесса обусловлена высокими требованиями, предъявляемыми к уровню знаний программирования обучающихся. Разработка моделей, в частности на базе закрытых библиотек Ornet, не позволяет получить/закрепить знания о принципах функционирования, протоколах промышленных и сенсорных сетей, а сводится к определению архитектуры системы путем задания тонких протокольных настроек узлов сети. Данный подход направлен в большей мере на решение задач планирования сетей, нежели на их изучение и исследование.

Дополнительной целью обучения является получение знаний в области моделирования сложных систем, рассматриваемых на примере изучения информационно-управляющих сетей [17]. Процесс образования должен основываться на изучении принципов дискретно-событийного моделирования (ДСМ), основ реализации метода Монте-Карло с механизмами организации работы модели по цепям событий, временем, синхронизацией и упорядочиванием событий, генерацией новых и других характерных особенностей. Такой процесс может быть организован в формате изучения эволюции развития систем моделирования: УООП, ОСИМ и ССИМ. Эффективность такого подхода обуславливается объемом приобретаемых обучающимся не только знаний, но и умений, навыков, а также практического понимания представленных в работах преимуществ и недостатков систем моделирования. Однако подход характеризуется высокими временными затратами, не предусмотренными в учебном процессе, требует профильных глубоких знаний в области программирования, и поэтому не является целесообразным в рамках решаемых задач. Изучение принципов дискретно-событийного моделирования на основе ССИМ характеризуется высокой сложностью, поскольку система не раскрывает внутренних механизмов реализации процесса моделирования: изменения модельного времени, продвижения заявок (пакетов), планирования и синхронизации процес-

сов. Это характерно и для ОСИМ MatLab, Arena, AnyLogic. Для изучения принципов ДСМ на УООП необходима их трудоемкая реализация в среде программирования, а также полное понимание организации механизма моделирования. Наибольшую эффективность изучения принципов событийного моделирования определяет применение широко распространенной в сфере образования общецелевой среды GPSS. Это обусловлено наличием прозрачных механизмов моделирования, доступных разработчику и способствующих пониманию и усвоению принципов моделирования. Обучение должно быть организовано на основе простейших моделей, в рамках изучения которых принципы моделирования могут анализироваться путем рассмотрения логики выполнения модели с пошаговым моделированием и анализом: модельного времени, цепей текущих и будущих событий, поля обслуживаемых элементов (заявок, транзактов) и их параметров, контроля значений и состояний обслуживаемых устройств. Представленный процесс изучения способствует более эффективному пониманию и усвоению принципов моделирования, которые позволят обучающемуся корректно понимать последовательности происходящих при моделировании служебных и пользовательских событий, что составляет объем знаний, необходимых для построения адекватных моделей сложных систем. Первичное изучение системы GPSS способствует более эффективному изучению и пониманию других дискретно-событийных систем моделирования. Все остальные анализируемые в работе СИМ характеризуются отсутствием возможности столь глубокого изучения логики процесса моделирования.

Сложным вопросом является анализ перспективности изучения и дальнейшего применения на практике определенной СИМ. Перспектива изучения ССИМ Ornet заключается в возможности использования полученных знаний и умений на практике при планировании и проектировании не только промышленных, но и корпоративных компьютерных систем и сетей. В рамках решения научно-исследовательских задач любой сложности актуальным является изучение наиболее мощной общецелевой системы моделирования AnyLogic, позволяющей моделировать алгоритмы и протоколы любой сложности. Универсальные подходы данной системы, приме-

няемые во всех областях исследований, определяют ее наиболее широкую перспективность использования. Перспектива изучения УООП для применения в качестве среды моделирования заключается в неограниченно высокой гибкости разработки модели, получении большого объема знаний и умений, которые могут составлять базу для разработки новой или модернизации существующей системы моделирования (как это происходит в настоящее время с развитием GPSS, Network Simulator и др.). Другие системы с представленными подходами моделирования используются преимущественно для анализа отдельных алгоритмов и частей протоколов.

### 5. Выбор эффективной системы имитационного моделирования

Выбор эффективной среды моделирования требует выполнения их оценки по предложенным критериям. Для оценки сред моделирования целесообразно принятие трехуровневой градации характеристик "(– | ± | +)". Низшая оценка "–" отражает недостаток, выражаемый в высокой сложности, невозможности либо отсутствии поддержки реализации требуемого свойства при моделировании. Средняя оценка "±" определяет ограниченные возможности, умеренную сложность реализации определенных свойств моделирования. Наивысшая оценка "+" определяет преимущество среды по поддержке и реализации определенного свойства моделирования по отношению к другим анализируемым СИМ. После оценки необходимо выполнение ранжирования СИМ. Для каждой системы необходим подсчет суммарной оценки количества положительных баллов. На основе максимального значения баллов делаются выводы об эффективности и вы-

бор СИМ. При равенстве баллов (отклонении не более 10 % от наилучшего варианта) предпочтение в выборе отдается системе с большей оценкой по приоритетным (первичным) критериям, определяющим возможности научно-практического использования моделей. Предложенный подход инвариантен и может при необходимости использоваться и для другой системы критериев и их приоритетов.

Результаты оценки сред имитационного моделирования информационно-управляющих сетей по предложенным критериям представлены в таблице.

По результатам ранжирования для разработки и исследования моделей информационно-управляющих сетей со случайным множественным доступом CSMA, в частности сети LonWorks, выбирается система моделирования AnyLogic. Выбор обусловлен наибольшим соответствием характеристик системы принятым требованиям и поставленным задачам. При этом среда моделирования AnyLogic сочетает преимущества:

- гибкости и масштабируемости разработки моделей в УОПП;
- простоты, адекватности разработки и возможности глубокой детализации сложных моделей с использованием визуального конструктора и агрегированных методов процессного, агентного моделирования ОСИМ; возможности проведения исследований с построением экспериментов варьирования параметров системы и их оптимизации;
- наглядного представления структуры и принципов функционирования модели, возможности создания интерактивных интерфейсов конфигурирования индивидуальных параметров элементов.

Результаты оценки сред имитационного моделирования информационно-управляющих сетей

Критерий	УООП		ОСИМ				ССИМ	
	Си	Java	MatLab	Arena	AnyLogic	GPSS	Opnet	NS-2
<b>Возможности и проблемы научно-практического использования моделей</b>								
Реализация экспериментов:								
• оценка	+	+	+	+	+	+	+	+
• варьирование	±	±	–	+	+	+	–	–
• оптимизация	–	–	–	+	+	±	±	–
Доступность СИМ	+	+	+	±	+	+	±	+
Создание приложения	+	+	–	–	+	–	+	–
Кросс-платформенность	+	+	+	–	+	–	–	+

Окончание таблицы

Критерий	УООП		ОСИМ				ССИМ	
	Си	Java	MatLab	Arena	AnyLogic	GPSS	Opnet	NS-2
<b>Возможности и проблемы разработки корректных моделей</b>								
Адекватность СИМ	±	±	+	+	+	±	+	+
Сложность и трудоемкость разработки модели:								
• визуальный конструктор	–	–	+	+	+	–	+	+
• программирование	–	–	–	+	+	±	±	±
• верификация (отладка)	–	–	–	±	+	+	–	–
• открытость	+	+	+	+	+	+	–	+
• ресурсоемкость	–	–	–	±	±	+	±	±
Гибкость разработки (подходы моделирования):								
• объектный	+	+	–	±	+	±	+	+
• процессный	–	–	+	+	+	+	±	–
• агентный	–	–	–	–	+	–	–	–
Масштабирование модели:								
• ручное	±	+	+	+	+	+	+	±
• программное	±	+	–	–	+	+	–	±
Визуализация функционирования	–	–	–	+	+	–	±	±
Модули и библиотеки системных элементов, алгоритмов, протоколов:								
• среды передачи	–	–	–	–	–	–	+	±
• алгоритмы случайного доступа	–	–	–	–	–	–	±	±
• адресация, маршрутизация	–	–	–	–	–	–	+	±
• сервисы и таймеры доставки	–	–	–	–	–	–	±	–
• приложения	–	–	–	–	–	–	±	–
<b>Проблемы и целесообразность использования СИМ в образовательном процессе</b>								
Сложность обучения (освоения)	–	–	±	+	+	±	–	–
Эффективность обучения	–	–	±	±	±	+	–	–
Перспектива применения полученных знаний и умений	±	±	–	–	+	–	±	–
Суммарная оценка (баллы)	11	11	10	16	21	15	18	15

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-37-00070 "Алгоритмы проектирования информационно-управляющих сетей LonWorks с требуемыми вероятностными и временными характеристиками".

### Список литературы

1. *Moshe Kam*. Collision Resolution Simulation for Distributed Control Architectures using LonWorks // IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. Edmonton, Canada: IEEE, 2005. P. 319–326.
2. *Miśkiewicz M*. Analysis of Mean Access Delay in Variable-Window CSMA // Sensors. Schweiz: Molecular Diversity Preservation International, 2007. Vol. 7. P. 3535–3559.
3. *Miśkiewicz M*. Access delay in LonTalk MAC protocol // Computer Standards & Interfaces. Nederland: Elsevier Science Publishing Company, 2009. P. 548–556.
4. *Buchholz P., Plonnigs J*. Analytical analysis of access-schemes of the CSMA type; Proc. of IEEE International Workshop on Factory Communication Systems WFCS'2004, Wien, 2004. P. 127–136.
5. *Даденков С.А., Кон Е.Л.* Подход к построению аналитической модели информационно-управляющей сети LonWorks на основе нейрочипов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. М.: Радиотехника, 2013. №11. С. 64–69.
6. *Плотников А.М., Рыжиков Ю.И., Соколов Б.В.* Современное состояние и тенденции развития имитационного моделирования в Российской Федерации // Труды СПИИРАН. СПб.: ФГБУН СПИИРАН, 2013. № 2(25). С. 42–112.

7. *Борцев, А.В.* Применение имитационного моделирования в России – состояние на 2007 г. // Имитационное моделирование. Теория и практика: сб. докл. III Всерос. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности ИММОД–2007. СПб.: ФГУП ЦНИИТС, 2007. Т. 1. С. 11–16.
8. *Девятков В. В.* Методология и технология имитационных исследований сложных систем: современное состояние и перспективы развития: моногр. М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М., 2014. 448 с.
9. *Олифер Н.А., Олифер В.Г.* Средства анализа и оптимизации локальных сетей // Материалы. учеб. курса Центра информационных технологий. URL: <http://citforum.ru/nets/optimize/> (дата обращения: 15.01.2019).
10. *Тарасов В.Н., Коннов А.Л., Ушаков Ю.А.* Анализ и оптимизация локальных сетей связи с помощью программной системы Ornet Modeler // Вестник Оренбургского государственного университета. 2006. № 6–2 (56). С. 197–204.
11. *Замятина Е.Б., Миков А.И., Михеев Р.А.* Особенности моделирования распределенных информационных систем // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2013. № 4. С. 107–118.
12. *Пантелеев М.Г., Кохтенко Н.В., Лебедев С.В.* Среда имитационного моделирования агентных систем реального времени // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 1 (77). С. 53–57.
13. *Борисенко А.С., Галкин П.В.* Адекватность моделей беспроводных сенсорных сетей в средах имитационного моделирования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. Т. 4, № 9 (64). С. 52–55.
14. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 418 с.
15. *Кельтон В., Лоу А.* Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2004. 847 с.
16. *Wai Kin Victor Chan, Young-Jun Son, Charles M. Macal.* Agent-based simulation tutorial – simulation of emergent behavior and differences between agent-based simulation and discrete-event simulation // Proceedings of the Winter Simulation Conference, December 05-08, 2010, Baltimore, Maryland.
17. *Яковлев С.А.* Методические основы использования имитационного моделирования в учебном процессе при подготовке по направлению 654700 "Информационные системы" // Информационно-управляющие системы. 2004. № 5. С. 44–49.

## **Choice of simulation modeling environment for information-control systems**

**S. A. Dadenkov, E. L. Kon**

Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia  
dadenkov@rambler.ru; +7-(909)-112-80-03

The paper analyzes simulation modeling environments and studies modeling of distributed information-control systems and protocols. Modeling environments of universal and general purpose, special purpose are analyzed by selected properties. The environment for general-purpose simulation modeling AnyLogic was chosen as the most efficient one to study information-control systems.

**Keywords:** *simulation modeling; characteristics of modeling environments; discrete-event simulation; distributed information-control systems; industrial data buses; agent-based simulation; analysis methods simulation.*