

---

ISSN 2306-1561

**Automation and Control in Technical Systems (ACTS)**

2015, No 3, pp. 3-15.

DOI: 10.12731/2306-1561-2015-3-1

---



## Systematic Approach and Simulation

**Konstantin Nikolaevich Mezencev**

Russian Federation, Ph. D., Associate Professor, Department of «Automated Control Systems».

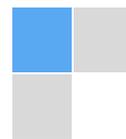
State Technical University – MADI, 125319, Russian Federation, Moscow, Leningradsky prospekt, 64. Tel.: +7 (499) 151-64-12. <http://www.madi.ru>

[mknpost@rambler.ru](mailto:mknpost@rambler.ru)

**Abstract.** The article deals with a number of provisions of the system approach, which are reflected in the modeling of various technical facilities. System approach allows more fully reflect communication domain modeled system between objects on the one hand, the objects and the environment on the other. This can be solved as a problem of the synthesis of the system and the task of investigating the behavior of the existing system.

Almost paradigm systematic approach to modeling systems are used in the technology of object-oriented modeling and software. One of the alternatives to the modern object-oriented technology is an agent-based simulation. The behavior of the system is formed as a result of the interaction of objects – agents are able to cooperate with other agents for the realization of the objective function of the system.

**Keywords:** system, element state control, bifurcation, class, object, agent.



УДК 004.438

## **Системный подход и имитационное моделирование**

**Мезенцев Константин Николаевич**

Российская Федерация, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные системы управления».

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», 125319, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, д.64, Тел.: +7 (499) 151-64-12, <http://www.madi.ru>

[mknpost@rambler.ru](mailto:mknpost@rambler.ru)

**Аннотация.** В статье рассмотрены ряд положений системного подхода, которые находят отражение при моделировании различных технических объектов. Системный подход позволяет наиболее полно отразить связи в предметной области моделируемой системы между объектами с одной стороны, объектами и внешней средой с другой. При этом может решаться как задача синтеза системы, так и задача исследования поведения существующей системы.

Практически парадигмы системного подхода в моделировании систем находят применение в технологии объектно-ориентированной разработки моделей и программного обеспечения. Одной из современных альтернатив реализации объектно-ориентированной технологии является агентное моделирование. Поведение системы формируется как результат взаимодействия объектов – агентов способных кооперироваться с другими агентами для реализации целевой функции системы.

**Ключевые слова:** система, элемент, состояние, управление, бифуркация, класс, объект, агент.

### **1. Введение**

Существуют различные виды определений систем [1, 2, 3]. При исследовании систем в рамках имитационного моделирования под системой на наш взгляд следует понимать некую совокупность элементов, обособленную от окружающей среды и взаимодействующей с ней как некое целое. Важной особенностью системы является невозможность выполнения отдельными элементами ее функций. Данная особенность

получила наименование эмерджентности. Чем сложнее система, тем больше различие между ней и составляющими ее элементами.

Проводя исследование системы, особое внимание уделяют характеру взаимодействия системы с внешней средой при этом можно выделить в общем виде следующие формы обмена [4, 9]:

- обмен энергией;
- обмен веществом;
- обмен информацией.

## **2. Классификация систем**

Проводя исследование систем на компьютере с использованием имитационных моделей, важным является соотношение исследуемой системы с определенным классом систем. В общем виде системы можно разделить на два больших класса природные и искусственные. Искусственные системы создаются человеком в процессе его деятельности. В составе искусственных систем можно выделить три основных класса: технические, автоматизированные и организационные.

С точки зрения структуры системы говорят о простых системах, сложных системах и больших [9, 13...16].

Простые системы состоят из определенного набора элементов. Сложные системы состоят из отдельных подсистем, а большие системы – это совокупность пространственно-распределённых сложных систем.

## **3. Технические системы**

Имитационное моделирование играет большую роль в разработке и анализе различных технических систем [5, 13...16]. Технические системы управления – это системы, которые содержат в качестве элементов технические устройства и могут в течение некоторого интервала времени функционировать без участия человека.

Технические системы управления имеют следующие особенности:

- четко определенную единственную цель управления;
- отсутствие человека в контуре управления;
- достаточно высокую определенность исходных данных и возможность формализации процессов функционирования.

В технических системах легко выделить объект управления и управляющую систему [4]. Такие системы можно рассматривать как совокупность устройств реализующих определенную потребность человека. При этом можно говорить о причинно – следственной цепочке:

**Потребность – Цель – Функционирование системы – Результат.**

В этой последовательности потребность можно определить как то, что объективно необходимо разработчику или заказчику для обеспечения его деятельности социальной или производственной.

В свою очередь цель: это совокупное представление о некоторой модели будущего результата, способного удовлетворить исходную потребность при имеющихся реальных возможностях, оцененных по результатам опыта.

Имитационное моделирование может быть использовано на всех этапах данной цепочки. Особое важное значение имитационное моделирование приобретает при синтезе технической системы, позволяя со сравнительно малыми затратами, проанализировать в условиях случайного изменения факторов, воздействующих на причинно – следственную цепочку, характер изменения ожидаемого результат от использования данной системы.

#### **4. Выбор модели системы**

Имитационное моделирование системы на компьютере требует предварительного определения концептуальной модели исследуемой системы. Имитационная модель позволяет исследовать систему с учетом влияния на нее определенной совокупности факторов.

Имитационную модель можно реализовать основными способами:

- исследование системы с учетом изменения выходных сигналов;
- исследование системы с учетом изменения выходных сигналов и изменений в структуре системы;
- исследование системы с учетом изменений выходных сигналов, структуры и с учетом влияния внешней среды.

#### **5. Концептуальные имитационные модели**

На концептуальном уровне создавая имитационную модель системы можно выделить следующие составные элементы:

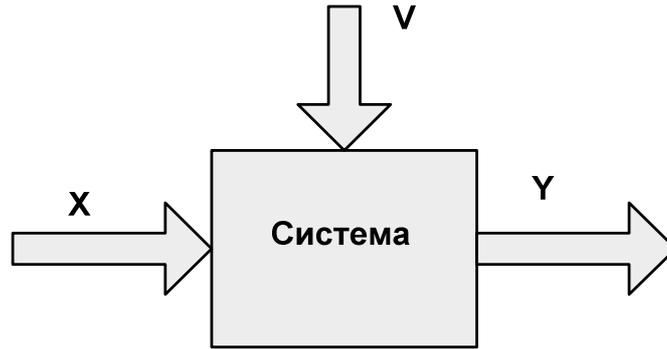
- множество входных сигналов  $X$ ;
- множество выходных сигналов  $Y$ ;
- каналы воздействия на систему возмущений  $V$  (рисунок 1).

В формализованном виде данные множества могут быть представлены как:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_i\} \quad (1)$$

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_i\} \quad (2)$$

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_i\} \quad (3)$$

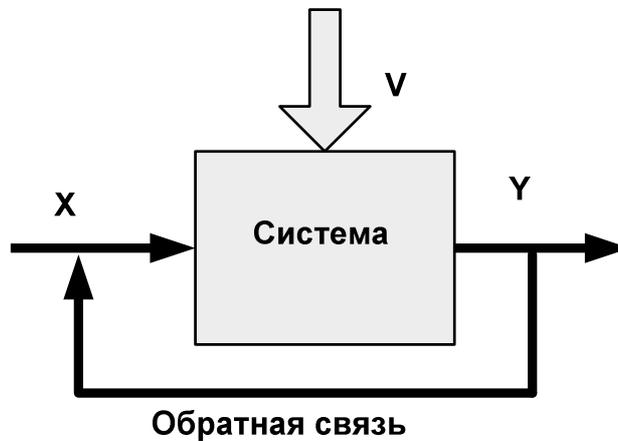


**Рисунок 1 – Система с прямым контуром управления**

Внешние возмущения в системе представляют собой «шум» помехи, характер изменения которых является случайным. На рисунке 1 показана не замкнутая система.

Большую гибкость в имитационном исследовании на ЭВМ представляют модели, в которых используют замкнутый контур, как это показано на рисунке 2. Такие модели могут быть реализованы как с положительной, так и с отрицательной обратной связью.

В большинстве моделей реализуется принцип отрицательной обратной связи - гомеостазиса. Разница между обобщенным входом  $X$  и обобщенным выходом  $Y$  называется рассогласованием модели. Отсутствие рассогласования означает, что модель отработала заданное воздействие.



**Рисунок 2 – Систем с замкнутым контуром управления**

## **6. Имитационное моделирование и структура системы**

Важным системным понятием является понятие элемента и структуры. Элементом системы называется ее неделимая часть. Под структурой системы будем понимать совокупность ее элементов связанных определенным образом. В общем виде структуру системы можно представить в виде:

$$S = \{e_{ij}\} \tag{4}$$

где  $i$  и  $j$  изменяются от  $1..n$ ;  $n$  – число связей в системе.

В процессе имитационного моделирования представляет интерес не структура, а поведение во времени ее параметров состояния. Под параметрами состояния понимать определенный набор атрибутов элементов, значения которых меняются во времени.

Таким образом, каждому элементу соответствует множество параметров состояния:

$$Z = \{z_{ij}\} \quad (5)$$

где  $Z$  – множество состояний системы, а  $z_j$  – значение параметра состояния системы для элемента  $i$ .

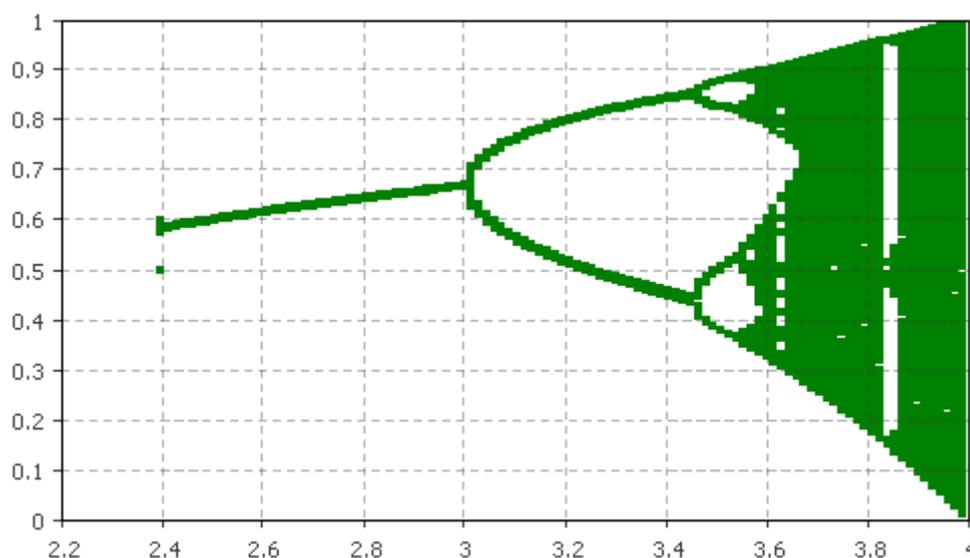
При имитационном исследовании системы представляет интерес исследование состояний с гомеостазисом. При таком состоянии параметры элементов системы обладают определенным постоянным значением.

В более сложных технических системах характер протекания изменения параметров состояния может содержать бифуркационные точки. В такой точке изменение параметров состояния может в дальнейшем носить устойчивый или не устойчивый характер.

Характер протекания бифуркационного процесса может быть исследован с помощью уравнения логистического отображения:

$$x_{n+1} = rx_n(1-x_n) \quad (6)$$

Качественный вид графика показан на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Процесс с бифуркацией**

Результат был получен путём моделирования по уравнению 6 в программе AnyLogic 6.4.1. Были приняты следующие значения для параметра  $r$ :

$$r \in [2, 4 \dots, 4.0].$$

При моделировании параметр  $r$  менялся в модели с шагом  $0.05$ .

В модели были реализованы следующие правила задания перехода к новой итерации  $r_i$ :

Если  $x_{n+1} = 0$ ;

Если число текущих итераций по  $r_i$  превысило 500;

Если Погрешность вычислений  $x_{n+1}$  для текущего  $r_i$   $d = \Delta i - \Delta i - 1$  меньше, либо равна  $10^{-4}$ .

## 7. Описание объекта исследования

Объектная технология предусматривает выделение в процессе моделирования абстрактных структур – классов, в составе которых разработчик объединяет атрибуты и операции для их обработки [1, 2].

Созданная модель строится путем получения экземпляров от этих классов. Экземпляры, полученные от одного класса, могут быть объединены в коллекцию. Получение экземпляра позволяет создать реальный объект с конкретным набором значений атрибутов и методов, которые представляют собой реализацию операций.

Взаимодействие между объектами реализуется путем вызова соответствующих методов. Вызов конкретного метода привязан к наступлению определенного события. В результате разработчик получает модель взаимодействующих объектов, в которой отражены реальные связи между объектами и специфика их взаимодействия.

Объектно-ориентированный подход предусматривает использование определенных механизмов взаимодействия между классами и их построения. К таким базовым механизмам следует отнести:

- наследование;
- инкапсуляция;
- полиморфизм.

Наследование – это способность одного класса передавать свои атрибуты и операции другому классу. Объект, который принимает операции и атрибуты называется подклассом, а объект источник суперклассом. В результате возникает иерархическая структура модели, как это показано на рисунке 4.

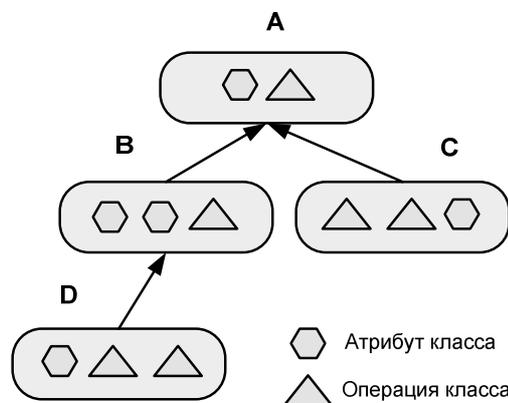


Рисунок 4 – Наследование. Стрелки указывают на суперкласс.

Наследование позволяет модернизировать модель, используя ранее разработанные алгоритмы обработки данных, добавляя в подклассы новые атрибуты и операции.

Во главе иерархии ставится «общий предок» абстрактный объект – базовый класс модели. Если в иерархии объектов модели имеются объекты, которые не являются суперклассами, то их называют листовыми. На рисунке 4 А – общий предок, С и D – листовые классы.

Процесс инкапсуляции в процесс моделирования представляет собой накопление атрибутов и операций в классах.

Важную роль в процессе объектного моделирования является полиморфизм. В модели могут быть классы с одинаковым именем, но выполняющие разные действия.

Рассмотренная парадигма моделирования путём выделения классов, подклассов и объектов не позволяет проследить динамический характер поведения сложной системы. Для сложных систем представляет интерес моделирование такой их стороны как кооперация отдельных подсистем в решения определённых задач в системе [3]. Причём характер кооперации между подсистемами носит динамический характер. В кооперацию может вступать различное число подсистем, в последствии кооперация может распадаться, когда надобность в объединении отпадает из – дальнейшей логики функционирования системы.

Моделирование кооперации в настоящее время реализуется на основе парадигмы активного объекта – агента [10]. Концепция агента представлена на рисунке 5.

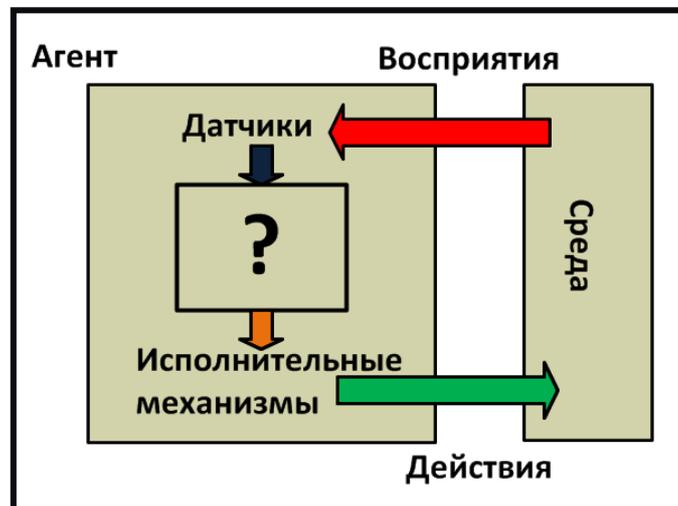


Рисунок 5 – Активный объект – агент

В случае программной – виртуальной реализации агента в качестве датчиков выступает интерфейс объекта, а исполнительные механизмы – методы – операции объекта, программный код которых определяет поведение агента в системе.

Современное объектное моделирование реализуется с применением технологии визуализации [1]. Визуальная технология разработки позволяет значительно ускорить процесс создания модели. Разработчику предоставляется возможность в режиме

дизайнера выполнить разработку элементов интерфейса модели и коммутацию объектов из библиотеки классов системы разработки модели.

Имитационное моделирование может быть реализовано в системах поддерживающих объектную технологию моделирования. В качестве примера рассмотрим две программы AnyLogic [6, 7, 17, 18, 19] и Netlogo [12].

## 8. Имитационное моделирование в среде AnyLogic

Программа предоставляет разработчику библиотеку объектов для визуального построения имитационной модели [6, 7]. Библиотеки содержат набор объектов для определенных классов. Так в версии AnyLogic 6.x имеется библиотека Enterprise Library где собраны объекты для построения дискретных имитационных моделей [17, 18, 19]. Этот класс моделей позволяет создать имитационные модели для синтеза и анализа систем массового обслуживания (СМО).

В качестве примера приведём модель СМО банкомата, расположенного в банковском офисе [7]. Для построения СМО используются объекты:

- *Source* – источник заявок – клиентов банка.
- *Queue* – очередь ожидающих обслуживания заявок - клиентов.
- *Delay* – элемент моделирующий узел обслуживания - банкомат.
- *Sink* – элемент принимающий отработанные заявки, для их уничтожения при работе модели.

Модель СМО показана на рисунке 6.

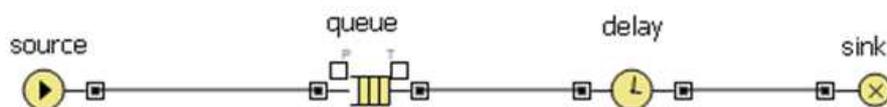


Рисунок 6 – Модель Банкомат

Разработчик, используя визуальный редактор системы, выбирает нужный объект из библиотеки, размещает его в поле модели и соединяет размещенные объекты, используя порты объектов. Они отображаются прямоугольниками для каждого из объектов.

Как известно имитационное моделирование позволяет исследовать объект с учетом фактора неопределенности. Программа AnyLogic предоставляют разработчику возможность генерации случайных величин, подчиняющихся различным законам распределения.

Так при создании имитационной модели СМО могут быть использованы треугольный закон распределения, экспоненциальный закон распределения, закон распределения Пуассона.

Программа разработки моделей AnyLogic создана на базе объектно-ориентированного языка программирования Java. Разработчик может создавать требуемые классы исходя из специфики модели. Либо размещенные объекты из библиотек в поле модели могут дополняться программным кодом Java.

Кроме того, система разработки позволяет представлять результаты моделирования в виде графиков и диаграмм. Допускается создавать анимацию движения моделируемых объектов.

## **9. Агентное моделирование в программе NetLogo**

В настоящее время имитационное моделирование используется широко для создания моделей больших распределенных систем. Такие системы состоят из множества связанных между собой элементов - объектов. Причем характер формирования этих связей часто носит случайный характер и имеет различную природу. Моделировать поведение таких систем с помощью формализованных моделей, представляющих собой описание системы в виде определенного набора уравнений, не представляется возможным [3].

Для распределенных систем так же характерно некоторое объединение элементов системы для решения определенной задачи. В процессе решения этой задачи в возникающее объединение могут добавляться новые элементы, либо исключаться имеющиеся. При этом можно говорить о создаваемых человеком распределенных системах с искусственным интеллектом.

При исследовании и проектировании распределенных систем выделяют в качестве элемента системы агента. С точки зрения компьютерного моделирования агент представляет собой некоторую программу, которая реализована на определенной программно-аппаратной платформе. Такая программа обладает интерфейсом – набором датчиков (сенсоров) для реагирования на события, происходящие в окружающей ее среде.

Агент, входящий в систему взаимодействует с другими агентами для выполнения определенной функции. В результате возникает система взаимодействующих агентов для решения определенной задачи, либо для выполнения определенной инструкции – установки. Такие системы в настоящее время принято называть мультиагентными системами, либо сокращенно МАС.

Если агент обладает функцией принятия решения для своего дальнейшего поведения в рамках МАС, то говорят о наличии «интеллекта» у агента. Мультиагентную систему, состоящую из таких агентов, называют интеллектуальной.

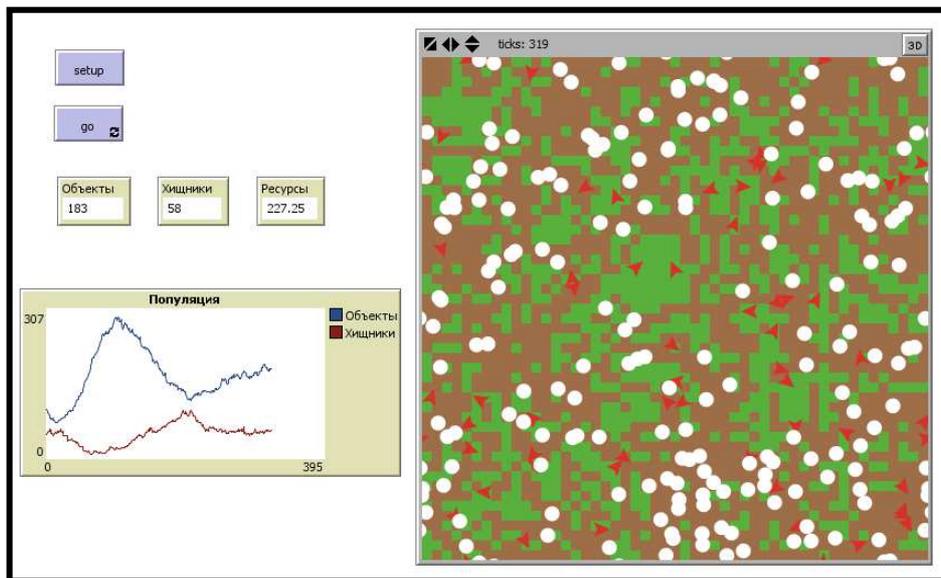
Модели, построенные в виде МАС, позволяют исследовать и планировать распределенные вычисления, поиск информации в глобальной сети Интернет, процессы движения автотранспортных средств и доставки грузов.

Программа NetLogo [12] представляет собой среду разработки компьютерных моделей на базе одноименного кроссплатформенного языка программирования NetLogo, предшественником которого был язык программирования StarLogo.

Создавая модель в среде NetLogo, разработчик создаёт виртуальный мир [8]. Основными элементами этого виртуального мира являются агенты:

- «Пятная» (Patches)
- «Черепашки»(Turtles)
- «Наблюдатель»(Observer)
- «Связи» (Links)

«Пятна» представляют собой прямоугольные области, совокупность которых представляет собой двухмерный мир, в котором «живут» агенты «черепашки». «Наблюдатель» – фиксирует изменения, происходящие в виртуальном мире, и может вмешиваться в «жизнь» агентов. Между «черепашками» могут быть установлены связи.



**Рисунок 7 – Окно работающей модели**

На рисунке 7 показан вид работающей модели NetLogo. В окне справа движутся агенты – черепашки. Это – виртуальный мир модели.

С лева располагаются элементы управления моделью и визуализации результатов моделирования. Эти элементы выбирает и настраивает разработчик модели.

Модель реализует механизм взаимодействия агентов по принципу «Хищник-Жертва». Треугольные агенты существуют и размножаются за счет уничтожения белых агентов. Белые агенты поддерживают свое существование за ресурсов пятен окрашенных в зеленый цвет. Этот ресурс возобновляется случайным образом. В модели всегда размещают две командные кнопки. Первая кнопка setup – используется для установки начальных параметров агентной модели, а вторая кнопка go – используется для запуска модели.

Построение модели сводится к написанию программного кода для управления агентами и вывода результата моделирования. Модель компилируется в программный код Java и может выполняться в рамках любой операционной системы, где установлена исполняемая среда Java.

Система предлагает разработчику визуальные компоненты для организации вывода результатов моделирования в виде графиков, диаграмм и сообщений, так как это показано на рисунке 7. Язык программирования NetLogo поддерживает большое число встроенных функций для генерации случайных величин и управления агентами.

## 10. Заключение

Имитационное моделирование и системный подход позволяют выполнить исследование систем различной природы с учетом широкого набора факторов.

Системное имитационное моделирование технических систем может быть реализовано с применением компьютера. Так как в таких системах можно однозначно выделить структуру системы, определить множество параметров состояния подлежащих исследованию.

Имитационное моделирование может производиться на моделях с наличием обратной связи и учетом изменений внутри системы и внешних факторов.

Объектная технология моделирования позволяет строить модели на базе экземпляров классов предметной области моделирования. Между классами могут быть установлены связи наследования для отображения иерархии объектов модели и модернизации модели в процессе ее эксплуатации.

Объектная технология реализована в специализированных программах имитационного моделирования. Такие программы содержат библиотеки объектов, которые имеют визуальную реализацию. Визуальная реализация позволят формировать структуру модели в графическом редакторе.

Если требуется, то модель дополняется программным кодом и классами разработчика модели.

Объектная парадигма позволят создавать модели взаимодействующих объектов. Такие объекты обладают индивидуальным поведением и могут кооперироваться в агентные системы для достижения определенной цели.

## Список информационных источников

- [1] Брукшир Д.Г. Введение в компьютерные науки / Д.Г. Брукшир, 6 – е издание. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 688 с.
- [2] Буч Г., Рамбо Д., Джекобсон А. Язык UML. Руководство пользователя/ Г. Буч, Д. Рамбо, А. Джекобсон. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 432 с.
- [3] Ивашкин Ю. А. Мультиагентное имитационное моделирование больших систем: учеб. пособие / Ю. А. Ивашкин. – М.: МГУПБ, 2008. – 230 с.
- [4] Мезенцев К.Н. Автоматизированные информационные системы / К.Н. Мезенцев. – М.: Издательский центр «Академия», 2010 – 176с.
- [5] Мезенцев К.Н. Моделирование в примерах и задачах /К.Н. Мезенцев. LAP LambertAcademic Publishing, 2013. – 205 с.
- [6] Мезенцев К.Н. Моделирование систем в среде AnyLogic 6.4.1.Часть 1: учеб. пособие / К.Н. Мезенцев, Под редакцией Заслуженного деятеля науки РФ, д.т.н., профессора А.Б.Николаева. – М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2011. – 103с.

- [7] Мезенцев К.Н. Моделирование систем в среде AnyLogic 6.4.1. Часть 2: учеб. пособие / К.Н. Мезенцев, Под редакцией Заслуженного деятеля науки РФ, д.т.н., профессора А.Б.Николаева. – М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2011. – 103с.
- [8] Мезенцев К.Н. Мультиагентное моделирование в среде NetLogo: учеб. пособие / К.Н. Мезенцев. – М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2014. – 169с.
- [9] Мухин В.Н. Исследование систем управления / В.Н. Мухин - М.: Издательство «Экзамен», 2006. – 479 с. Остроух А.В. Интеллектуальные системы в науке и производстве / А.В. Остроух, А.Б. Николаев. – Saarbrücken, Germany: Palmarium Academic Publishing, 2012. – 312 p. – ISBN 978-3-659-98006-0.
- [10] Белоусова А.И. Подход к формированию многоуровневой модели мультиагентной системы с использованием миваров / А.И. Белоусова, О.О. Варламов, М.Н. Краснянский, А.В. Остроух // Перспективы науки. – Тамбов: «ТМБПринт», 2011. – № 5(20). – С. 57-61.
- [11] Мезенцев К.Н., Джха П. Методы моделирования компьютерных сетей // Автоматизация и управление в технических системах. – 2014. – № 2 (10). – С. 29-40. DOI: 10.12731/2306-1561-2014-2-4.
- [12] Мезенцев К.Н. Мультиагентное моделирование в среде NETLOGO // Автоматизация и управление в технических системах. – 2015. – № 1 (13). – С. 10-20. DOI: 10.12731/2306-1561-2015-1-2.
- [13] Остроух А.В. Ввод и обработка цифровой информации: учебник для нач. проф. образования / А.В. Остроух. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 288 с. – ISBN 978-5-7695-9457-1.
- [14] Остроух А.В. Системы искусственного интеллекта в промышленности, робототехнике и транспортном комплексе: монография / А.В. Остроух – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2013. – 326 с. – ISBN 978-5-906314-10-9.
- [15] Остроух А.В. Основы информационных технологий: учебник для сред. проф. образования / А.В. Остроух. – М.: Издательский центр «Академия», 2014. – 208 с. – ISBN 978-5-4468-0588-4.
- [16] Остроух А.В. Автоматизация управления автотранспортными предприятиями. Новый подход на основе интеллектуальных мультиагентных систем / А.В. Остроух, А.В. Воробьева, Н.Е. Суркова. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 117 p. – ISBN 978-3-659-47576-4.
- [17] Обухов П.А., Николаев А.Б., Остроух А.В. Исследование эффективности работы сетевых серверов в среде имитационного моделирования AnyLogic // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 3-3. – С. 338-342.
- [18] Обухов П.А., Николаев А.Б. Разработка имитационных моделей в среде anylogic для исследования эффективности работы компьютерных сетей // Автоматизация и управление в технических системах. – 2014. – № 4 (12). – С. 71-81. DOI: 10.12731/2306-1561-2014-4-8.
- [19] Вэй П.А. Разработка имитационной модели смесительной системы в среде ANYLOGIC // Автоматизация и управление в технических системах. – 2014. – № 3 (11). – С. 104-111. DOI: 10.12731/2306-1561-2014-3-9.