УДК 519.248

И. М. Якимов, А. П. Кирпичников, В. В. Мокшин

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ В ИМИТАЦИОННОЙ СРЕДЕ ANYLOGIC

Ключевые слова: имитационное моделирование, сложная система, система массового обслуживания, система AnyLogic, заявка, генератор транзактов, очередь, обслуживающий аппарат.

Приводится описание методики моделирования сложных систем, включающей в себя построение имитационных моделей в системе AnyLogic, позволяющей вводить структуры моделируемых систем в графическом виде. Приводятся несколько наиболее характерных моделей систем массового обслуживания.

Keywords: imitation modeling, complex system, queuing system, the system AnyLogic, application generator TRANSACT, queue serving device.

The article describes a technique for simulating complex systems, including the construction of simulation models in the AnyLogic, allows you to enter the structure of the simulated systems in graphical form. Are some of the most typical models of queuing systems.

Введение

Бурное развитие информационных технологий, наблюдаемое в последнее время, привело к серьёзным революционным изменениям в предметной области по моделированию систем. И если раньше в РФ доминирующим средством моделирования систем был специализированный язык GPSS и большинство специалистов по моделирования владели им, то в настоящее время появился, чуть ли не десяток других систем моделирования, позволяющих ввод структур моделируемых систем в графическом виде. Встают актуальные задачи по выбору системы моделирования под конкретную предметную область моделирования и быстрому обучению моделированию в выбранной системе.

Авторы данной статьи ранее опубликовали две статьи, посвященные вопросам обучения имитационному моделированию в системе GPSS W с расширенным редактором [1] и в системах BPWin-Arena [2]. Данная статья рассматривает вопросы обучения в системе моделирования AnyLogic. Все три статьи написаны по одной и той же методике изложения и их применение проиллюстрировано на одних и тех же имитационных моделях трёх типовых систем массового обслуживания (СМО), что по мнению авторов способствует выбору наиболее пригодных программных средств для моделирования конкретных СМО конкретными пользователями.

AnyLogic - программное средство для имитационного моделирования систем и процессов, разработанное российской компанией «Экс Джей Технолоджис» (англ. XJ Technologies) [3].Первая версия системы AnyLogic 4.0 разработана в 2003 году (желательно уточнить). В 2014 году разработана версия AnyLogic 7. Система AnyLogic включает в себя графический язык моделирования и позволяет пользователю расширять созданные модели с помощью языка Java.

В процессе разработки имитационной модели пользователю доступна «Палитра компонентов моделей», приведённая на рис.1. Она включает в себя совокупность библиотек по отдельным тематическим разделам. Объекты основной библиотеки AnyLogic являются строительными блоками, с помощью которых строятся структурные схемы модели. По своей функциональной принадлежности объекты подразделяются на несколько категорий, их краткое описание приведено в таблице 1. Для обработки результатов моделирования используется методика, описанная в статьях [4-7].

Модель 1. СМО - генератор транзактов (ГТ) (равномерный закон 10±6) – очередь неограниченной длины – обслуживающий аппарат (ОА) (равномерный закон 9±7). Остановить моделирование после вывода из модели 200 транзактов.

На рис.1 приведена структурная схема примера 1, сформированная в системе AnyLogic, с результатами моделирования.

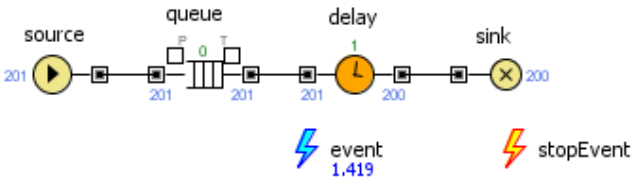
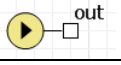
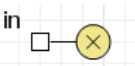
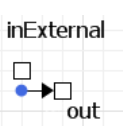
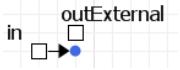
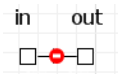
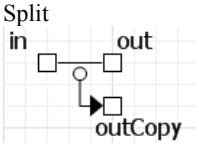
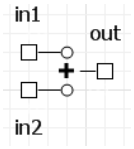
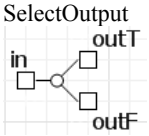
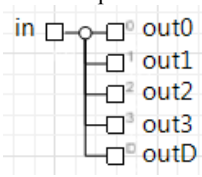
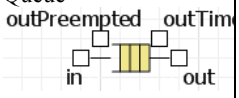
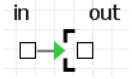
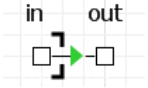
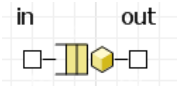
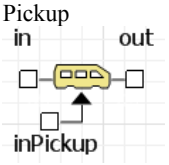
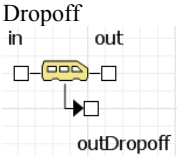
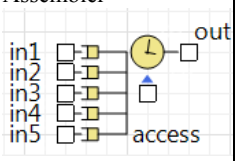
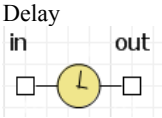
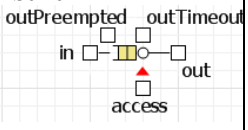
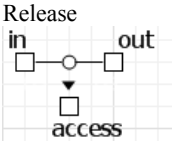
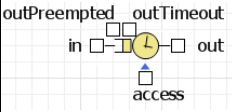


Рис. 1 – Структурная схема примера 1 в системе AnyLogic

Таблица 1 – Объекты палитры основной библиотеки

Категория	Наименование и графическое представление	Функция
Поток заявок	Source 	Создает заявки
	Sink 	Уничтожает поступающие заявки
	Enter 	Вставляет уже существующие заявки в определенное место внутри процесса, заданного потоковой диаграммой.

Категория	Наименование и графическое представление	Функция
	Exit 	Извлекает поступающие в объект заявки из процесса, заданного потоковой диаграммой, позволяя пользователю самому решать, что следует сделать с этими заявками.
	Hold 	Блокирует/разблокировывает поток заявок на определенном участке структурной схемы.
	Split 	Для поступающей заявки объект создает заданное число новых заявок (копий) и посылает их дальше.
	Combine 	Дожидается поступления двух заявок в порты in1 и in2 (в произвольном порядке), а затем создает новую заявку и направляет ее на выходной порт.
	SelectOutput 	Направляет входящие заявки в один из двух выходных портов в зависимости от выполнения заданного условия.
	SelectOutput5 	Объект направляет входящие заявки в один из пяти выходных портов в зависимости от выполнения заданных (детерминистических или заданных с помощью вероятностей) условий.
	Queue 	Хранит заявки в определенном порядке. Моделирует очередь заявок, ожидающих приема объектами, следующими за данным в потоковой диаграмме.
	Match	Синхронизирует два потока заявок путем нахождения пар заявок, удовлетворяющих заданному критерию соответствия.
	RestrictedAreaStart 	Обозначает вход в область процесса, в которой одновременно может находиться ограниченное количество заявок.
	RestrictAreaEnd 	Обозначает выход из области процесса, в которой может находиться только ограниченное количество заявок.

Категория	Наименование и графическое представление	Функция
Работа с содержимым заявки	Batch 	Преобразует заданное количество поступающих в объект заявок в одну заявку-партию.
	Unbatch 	Извлекает все заявки, содержащиеся в поступающей заявке-партии и пересылает их далее. Сама заявка-партия при этом уничтожается.
	Pickup 	Удаляет заявки из заданного объекта Queue и добавляет их к содержимому поступающей заявки-контейнера.
	Dropoff 	Удаляет избранные заявки из поступающей заявки-контейнера и пересылает их далее.
	Assembler 	Осуществляет сборку одной новой заявки из определенного числа заявок, пришедших из различных источников (до 5).
Обработка	Delay 	Задерживает заявки на заданный период времени.
Работа с ресурсами	ResourcePool 	Задает набор ресурсов, которые могут захватываться и освобождаться заявками.
	Seize 	Захватывает для заявки заданное количество ресурсов определенного типа.
	Release 	Освобождает ранее захваченные заявкой ресурсы.
	Service 	Занимает для заявки заданное количество ресурсов, задерживает заявку, а затем освобождает занятые ею ресурсы.

В этой и последующих моделях используется модифицированный класс транзакта *MyEntity* с параметрами: время нахождения в системе и время вхождения, приведённый ниже.

```
1.  /**
2.   * MyEntity
3.   */
4.  public class MyEntity extends
    com.xj.anylogic.libraries.enterprise.Entity
    implements java.io.Serializable {
5.      public double timeArrived = 0;
6.      public double timeIn = 0;
7.       /**
8.        * Конструктор по умолчанию
9.        */
10.      public MyEntity(){
11.      }
12.      /**
13.       * Конструктор, инициализирующий поля
14.       */
15.      public MyEntity(double timeArrived){
16.             this.timeArrived = timeArrived;
17.      }
18.      @Override
19.      public String toString() {
20.      return
21.      "timeArrived = " + timeArrived +" ";
22.      }
23.      /**
24.       * Это число используется при сохране-
    нии состояния модели<br>
25.       * Его рекомендуется изменить в случае
    изменения класса
26.       */
27.      private static final long
    serialVersionUID = 1L;
28. }
```

Кроме этого класса во всех моделях используются блоки для сбора статистики (*statistics, workTimeOneTransact_dataset, workTimeGist_data*) и блоки-файлы (*workTimeGist, workTimeOneTransact, transactCount*) для сохранения статистики в файле.

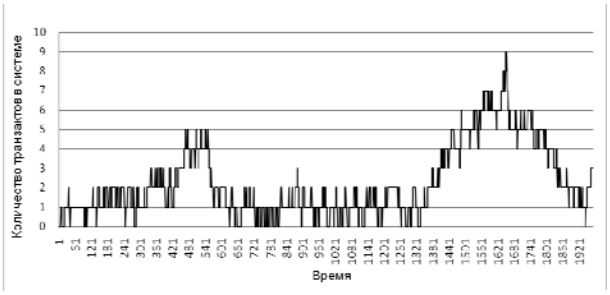
Для каждого элемента требуется ввести значения параметров во вкладке «Свойства», в соответствии с условиями задачи. как показано на рис.2 – рис.7. Блок *source* генерирует заявки по равномерному закону 10±6 единиц времени. Блок *delay* задерживает заявки по равномерному закону 9±7 единиц времени и записывает время задержки в *statistics*. Блок *sink* уничтожает заявки и записывает время их пребывания в системе. Событие *event* отслеживает количество заявок в системе и сохраняет его. Событие *stopEvent* заканчивает моделирование и регистрирует результаты моделирования. Описание программы ниже:

Действие:

```
workTimeGist.print(workTimeGist_data.toString());
queue_timeGist.print(queue_timeGist_data.toString());
for (int i=0; i<workTimeOneTransact_dataset.size(); i++)
    workTimeOneTransact.printf("%f\n",workTimeOneTransact_dataset.getY(i));
for (int i=0; i<transactCount_dataset.size(); i++)
    transactCount.printf("%f\n",transactCount_dataset.getY(i));
for (int i=0; i<queue_length_dataset.size(); i++)
    queue_length.printf("%f\n",queue_length_dataset.getY(i));

text.setText("Количество транзактов в системе: " +
    (source.count() - sink.count()));
text1.setText("Занятость delay: " +
    (delay_statistics.sum()/time()));
finishSimulation();
```

Количество сгенерированных транзактов: 201. Количество решенных задач: 200. Занятость устройства: 92%. Наиболее интересные результаты можно получить в графическом виде, как это показано на рис.2 а, б.

а



б

Рис. 2 – а) График распределения времени задержки заявки в системе, б) График изменения количества заявок в модели

В системе AnyLogic не формируются отчеты, привычные в GPSS World и необходимо самим вводить параметры, по которым необходимо получить результат.

По результатам моделирования сделаем заключение, что среднее время обслуживания устройством одного транзакта – 8.792 сравнительно ненамного отличается от заданного среднего значения – 9.0; коэффициент использования устройства – 0.854 также не на много отличается от отношения среднего времени обслуживания к среднему времени между поступлением транзактов – 0.9. По статистическим данным по функционированию очереди отметим, что средняя длина очереди равна – 0.548, количество входов в очередь с нулевым временем ожидания – 78, среднее время ожидания в очереди – 5.6 и без учёта «нулевых» транзактов – 9.169. Таким образом, можно сделать заключение о том, что результаты моделирования не противоречат здравому смыслу.

Модель 2. СМО с генераторами транзактов с нулевым и первым приоритетами. Для нулевого приоритеа ГТ (равномерный закон 10±4) – очередь неограниченной длины – ОА (равномерный закон 8±5). Для первого приоритеа ГТ (равномерный закон 10±4) – очередь неограниченной длины – ОА (экспоненциальный закон, среднее 25). Отказы транзактам с нулевым приоритетам при поступлении транзактов с первым приоритетом. Остановить моделирование после вывода из модели 100 транзактов.

На рис.3 приведена структурная схема модели 2, сформированная в системе AnyLogic, с результатами моделирования.

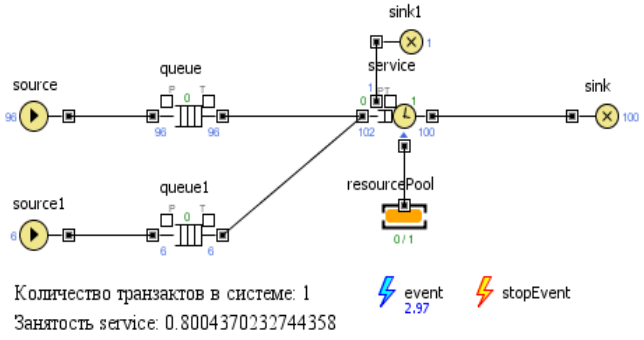


Рис. 3 – Структурная схема модели 2, сформированная в системе AnyLogic, с результатами моделирования

Листинг класса *MyEntity* такой же, как и в предыдущем примере. Далее для каждого элемента введем значения параметров во вкладке «Свойства», в соответствии с условиями задачи. Блок *source* генерирует транзакты по равномерному закону 10±4. Блок *source1* генерирует транзакты по равномерному закону 150±60. Блоки *queue* и *queue1* выполняют роль буфера и собирают статистику о своем состоянии. Блок *service* задерживает транзакт по равномерному закону 8±5 либо по экспоненциальному закону со средним 25 в зависимости от приоритета, выполняет выталкивание менее приоритетных задач и записывает время задержки. Блок *sink* уничтожает транзакты и записывает время их пребывания в системе. Блок *sink1* уничтожает транзакты, обработка которых прервана по приоритету. Событие *event* следит за количеством транзактов в системе и сохраняет его. Событие *stopEvent* прерывает моделирование и сохраняет статистику.

Все блоки модели 2, кроме блока *service,* аналогичны блокам модели 1. Так как событие *stopEvent* значительно отличается от аналогичного события примера 1, то приведём его настройки:

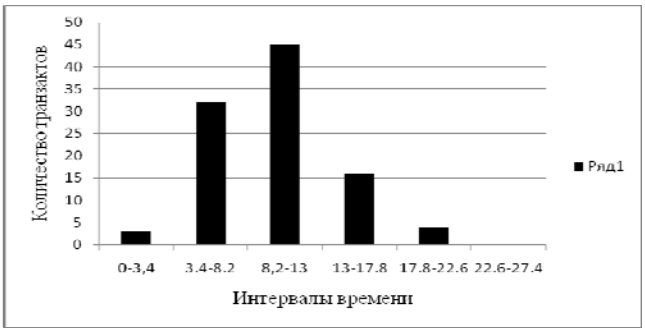
Условие: `sink.count()==100`

Действие:

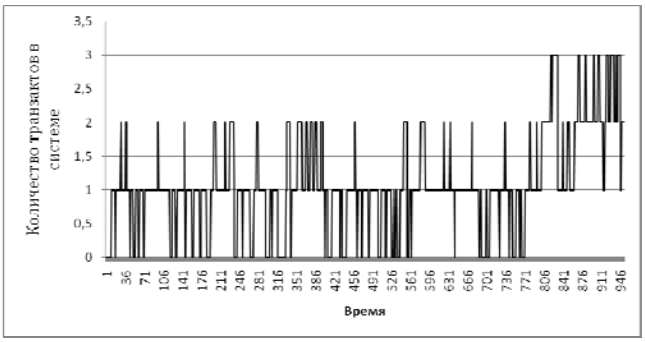
```
workTimeGist.print(workTimeGist_data.toString());
queue_timeGist.print(queue_timeGist_data.toString());
for (int i=0; i<workTimeOneTransact_dataset.size(); i++)
    workTimeOneTransact.printf("%f\n",workTimeOneTransact_dataset.getY(i));
for (int i=0; i<transactCount_dataset.size(); i++)
    transactCount.printf("%f\n",transactCount_dataset.getY(i));
for (int i=0; i<queue_length_dataset.size(); i++)
    queue_length.printf("%f\n",queue_length_dataset.getY(i));
for (int i=0; i<queue1_length_dataset.size(); i++)
    queue1_length.printf("%f\n",queue1_length_dataset.getY(i));

text.setText("Количество транзактов в системе: " +
    (source.count() + source1.count() - sink1.count() - sink.count()));
text1.setText("Занятость service: " +
    (service_statistics.sum()/time()));
finishSimulation();
```

Результаты моделирования можно привести в графическом виде, наиболее интересные из них приведены на рис.4.

В результате моделирования получили следующие результаты:
Количество сгенерированных транзактов: 102.
Количество решенных задач: 100.
Транзактов осталось в системе: 1
Занятость устройства service: 0.8
Средняя длина очереди queue: 0.5
Среднее время задержки одного транзакта в очереди queue: 0
Средняя длина очереди queue1: 0
Среднее время задержки одного транзакта в очереди queue1: 0
Средние время выполнения задачи: 8,872.



а



б

Рис. 4 – а) График распределения времени пребывания транзакта в системе; б) График количества транзактов в системе по времени

По содержимому отчёта отметим, что в программе для неприоритетных транзактов для имитации очереди использована память с именем queue, а для приоритетных – очередь с именем queue1. Всего в модели обслужено 96 неприоритетных транзактов и 6 приоритетных. Обслуживание 1 неприоритетного транзакта прервано и он выведен из системы без обслуживания. Всего до завершения моделирования из системы выведено 100 транзактов.

Среднее время обслуживания устройством одного транзакта – 8.353; коэффициент использования устройства – 0,8. Среднее количество транзактов в памяти 1. Транзакты первого приоритета в очереди не задерживались.

Модель 3. СМО генератор транзактов (равномерный закон 10±3) –восемь устройств (равномерный закон 100±50 для каждого). Выбор устройства по правилу «первый свободный с наименьшим номером». Если все устройства заняты транзакт получает отказ. Остановить моделирование после вывода из модели 100 транзактов.

На рис.5 приведена структурная схема примера 2, сформированная в системе AnyLogic, с результатами моделирования.

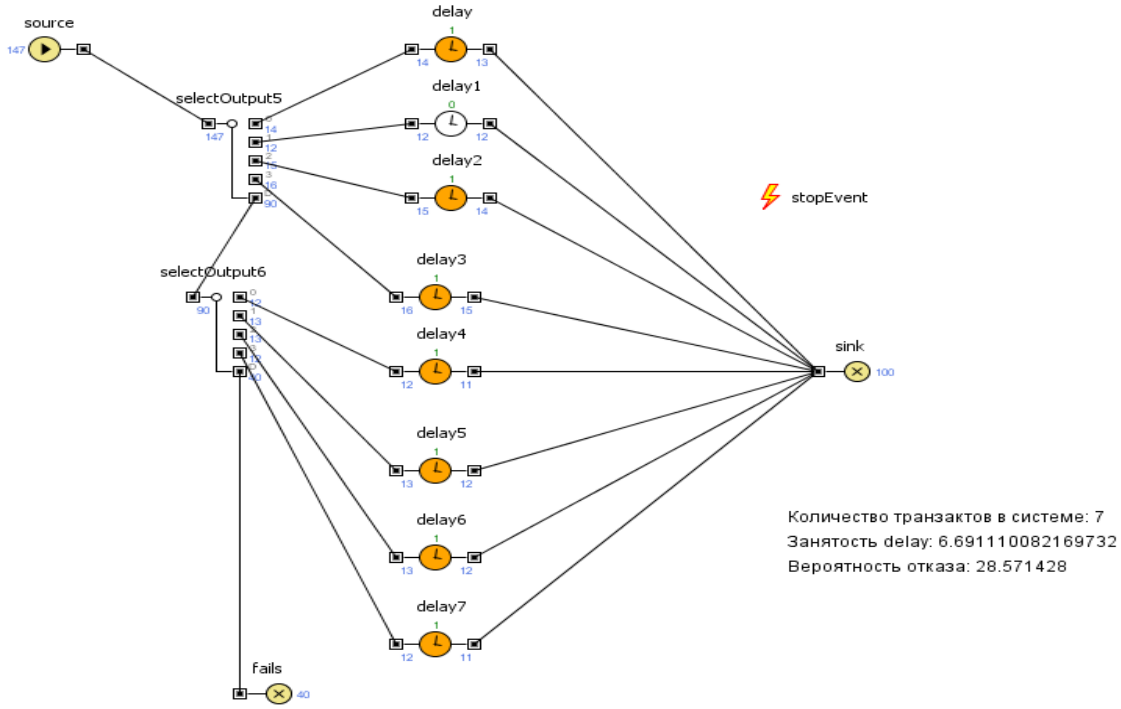


Рис. 5 – Структурная схема модели 3, сформированная в системе AnyLogic, с результатами моделирования

Модифицированный класс транзакта *MyEntity,* приведён далее, с параметрами: время нахождения в системе, время вхождения, времена начала и конца задержки.

```
/**
 * MyEntity
 */
Public class MyEntity extends com.xj.anylogic.libraries.enterprise.Entity implements java.io.Serializable {

Public double timeArrived = 0;
public double timeIn = 0;
public double delayIn = 0;
public double delayOut = 0;
    /**
     * Конструктор по умолчанию
     */
public MyEntity(){
     }

     /**
      * Конструктор, инициализирующий поля
      */
public MyEntity(double timeArrived){
            this.timeArrived = timeArrived;
     }

     @Override
     public String toString() {
            return
                    "timeArrived = " + timeArrived +" ";
     }

     /**
      * Это число используется при сохранении состояния модели<br>
      * Его рекомендуется изменить в случае изменения класса
     */
     privatestaticfinallong serialVersionUID = 1L;

}
```

Кроме этого класса во всех моделях используются блоки для сбора статистики (*statistics, workTimeOneTransact_dataset, workTimeGist_data,* etc).

Блок *source* генерирует транзакты по равномерному закону.

Блок *selectOutput* распределяет транзакты между delay1 и delay n.

Блоки *queue* используются для формирования очередей транзактов.

Блок *delay* задерживает транзакты и записывает время их задержки в *statistics*.

Блок sink уничтожает транзакты и записывает время их пребывания в системе, обновляет графики «Распределение времени выполнения» и «Время выполнения одного транзакта в блоке *delay*».

Событие *event* отслеживает количество транзактов в системе и регистрирует его.

Событие *stopEvent* прерывает моделирование и регистрирует статистику.

Далее для каждого элемента вводятся значения параметров во вкладке «Свойства», в соответствии с условиями задачи.

По содержимому стандартного отчёта GPSS сделаем выводы, что устройства сравнительно сильно загружены, коэффициент использования первого устройства – 0,938; восьмого – 0,606. Разница в загрузке устройств значительная – 0,332. В систему для обслуживания поступило 107 транзактов, из них 87 обслужено; 7 находятся на обслуживании и 13 получили отказ из-за занятости устройств. Вероятность отказа 0,13. Время пребывания транзакта в системе 76.292, стандартное отклонение времени пребывания в системе 27.762.

Недостаток: сравнительно значительная разница в загрузке устройств, что объясняется при-

нятой дисциплиной выбора «первый свободный с наименьшим номером».

Заключение

По сравнению систем GPSS W с расширенным редактором, BPwin-Arena и AnyLogic можно отметить, что по наглядности представления структурных моделей первое место занимает AnyLogic, второе - BPwin-Arena и третье - GPSS W с расширенным редактором. По простоте освоения систем первое место занимает BPwin-Arena, второе - GPSS W с расширенным редактором и третье – AnyLogic. По простоте внесения в систему изменений с необходимостью введения новых программных моделей первое место занимает GPSS W с расширенным редактором, второе - BPwin-Arena и третье – AnyLogic.

AnyLogic – мощный инструмент имитационного моделирования, который позволяет моделировать любые системы с помощью основных методов моделирования или комбинации двух и более методов в одной модели для достижения лучшего результата. Кроме удобного справочного материала, находящегося непосредственно в самом программном продукте, быстроте начала работы также способствует продуманный и интуитивно понятный интерфейс.

Исходя из этого, можно порекомендовать моделирование в системе BPwin-Arena экономистам, тем более что в этой системе есть возможность моделирования бизнес-процессов по рабочим календарям. Система AnyLogic наиболее хорошо понятна научно- техническому персоналу и имеет явно выраженный инженерный стиль. Систему GPSS W с расширенным редактором можно рекомендовать к применению специалистам информационного профиля (программистам) в условиях, когда требуется «дописывать» значительные объёмы новых программ.

Отметим, что при формировании заключения сказался имеющийся опыт некоторых авторов, в частности, первый автор более 30 лет ведёт занятия по моделированию на языке GPSS и только последние два года в системах GPSS W с расширенным редактором, BPwin-Arena и AnyLogic.

Литература

1. Якимов И.М., Кирпичников А.П., Мокшин В.В., Костюхина Г.В., Шигаева Т.А. Комплексный подход к моделированию сложных систем в системе BPwin-Arena // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 6. С. 287-292.
2. Якимов И.М., Кирпичников А.П., Мокшин В.В. Моделирование сложных систем в среде имитационного моделирования GPSS W с расширенным редактором // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 4. С. 298-303.
3. Карпов Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic. – СПб: БХВ-Петербург, 2006. – 400 с.
4. Мокшин В.В., Якимов И.М. Метод формирования модели анализа сложной системы / Информационные технологии, №5. – М.: Изд-во Новые технологии, 2011. – С. 46-51.
5. Мокшин В.В., Кирпичников А.П., Шарнин Л.М. Отслеживание объектов в видео потоке по значимым признакам на основе фильтрации частиц // Вестник Казанского технологического университета. – Казань: КНИТУ, 2013. Т. 16. № 18. – С. 297-303.
6. Степанова М.А., Сытник А.С., Кирпичников А.П., Мокшин В.В. Оптимизация процесса ремонта грузоподъемных машин по математической модели // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 20. С. 309-314.
7. Мокшин В.В., Якимов И.М., Юльметьев Р.М., Мокшин А.В. Рекурсивно-регрессионная самоорганизация моделей анализа и контроля сложных систем // Нелинейный мир. М: 2009. №1. С. 48-63.

© **И. М. Якимов** - канд. техн. наук, проф. каф. автоматизированных систем обработки информации и управления КНИТУ-КАИ им А.Н.Туполева; **А. П. Кирпичников** - д-р физ.-мат. наук, зав. каф. интеллектуальных систем и управления информационными ресурсами КНИТУ, kirpichnikov@kstu.ru; **В. В. Мокшин** - канд. техн. наук, доц. каф. автоматизированных систем обработки информации и управления КНИТУ-КАИ им А.Н.Туполева, vladimir.mokshin@mail.ru.

© **I. M. Yakimov**- PhD, Professor of the Department of Automated Information Processing Systems & Control, KNRTU-KAI; **A. P. Kirpichnikov** - Dr. Sci, Head of the Department of Intelligent Systems & Information Systems Control KNRTU, kirpichnikov@kstu.ru; **V. V. Mokshin** - PhD, Associate Professor of the Department of Automated Information Processing Systems & Control, KNRTU-KAI, vladimir.mokshin@mail.ru.