

И. М. Якимов, А. П. Кирпичников, В. В. Мокшин,  
Г. В. Костюхина, Т. А. Шигаева

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ В СИСТЕМЕ BPWIN-ARENA

*Ключевые слова: компьютерное моделирование, структурное моделирование, имитационное моделирование, бизнес-процесс, система BPwin-Arena, система массового обслуживания, сущность (транзакт), генератор сущностей, обслуживающий аппарат (ОА).*

*Приводится описание методики компьютерного моделирования сложных систем и бизнес-процессов, включающей в себя построение структурных моделей в системе BPwin и имитационных моделей в системе Arena, позволяющим вводить структуры моделируемых процессов в графическом виде. Приведены наиболее характерные модели систем массового обслуживания. Тем самым показан переход от структурного моделирования к моделированию количественному.*

*Keywords: computer modeling, structural modeling, simulation, business process, system BPwin-Arena, system of mass service, the essence (TRANSACTION), generator entities serving apparatus (GESA).*

*Describes the methods of computer simulation of complex systems and business processes, including the construction of structural models in the system BPwin and simulation models in the system Arena, allows you to enter the structure of the simulated processes graphically. 3 shows the most typical models of queuing systems. Thus the transition from the simulation of structural modeling to quantify.*

### Введение

В последнее время для моделирования сложных систем и процессов, под которыми далее будем понимать любую систематическую деятельность, начали применять программные системы, позволяющие осуществлять графический ввод структурных схем моделируемых сложных систем и бизнес-процессов. Краткий обзор возможностей таких систем приведён в [1]. Для сохранения конкурентной способности программной системы GPSS W в фирме ОАО «Элина» г. Казань разработано расширение редактора, позволяющее вводить структуры моделируемых процессов в графическом виде. [2].

В то же время несомненный интерес вызывают и другие системы структурно-имитационного моделирования и особенно совокупность систем BPwin-Arena, благодаря широкому применению представления структур бизнес-процессов и сложных систем в виде диаграмм IDEF3. Обеспечение непосредственного перехода от представления структурных схем сложных процессов в виде диаграмм IDEF3 к структурным схемам в нотации системы Arena ещё более повысило привлекательность системы BPwin-Arena у пользователей.

Авторами данной статьи написано учебное пособие для освоения моделирования в системе BPwin-Arena, построенное по методике изучения моделирования в системе GPSS W [3]. Это позволяет значительно ускорить процесс освоения системы BPwin-Arena для пользователей, знакомых с имитационным моделированием (ИМ) на языке GPSS [4]. В учебном пособии [4] приведено свыше 50 сравнительно несложных имитационных моделей, охватывающих широкий круг приёмов моделирования систем массового обслуживания (СМО). В статье приведены имитационные модели, построенные в системе BPwin-Arena, для трёх из них, часто встречающихся на практике. Для сравнительно несложных

моделей СМО с экспоненциальными законами функционирования их элементов результаты имитационного моделирования можно сравнить с результатами аналитического моделирования, опубликованными в работах [5, 6].

В статье рассматриваются вопросы только самого имитационного моделирования. Общая технология исследования сложных систем и бизнес-процессов на основе ИМ описана в [3, 7]. В работах [8-12] приведены примеры исследования конкретных бизнес-процессов, проведённые на основе ИМ.

### IDEF-диаграммы

Стандарт IDEF был разработан в 1981 году в рамках обширной программы автоматизации промышленных предприятий, которая носила обозначение ICAM и первая его редакция была выпущена в декабре 1993 года Национальным Институтом по Стандартам и Технологиям США (NIST). Программная поддержка построения IDEF-диаграмм производится пакетами BPwin, разрабатываемыми фирмой PLATINUM. IDEF-технология в настоящее время включает в себя 14 различного вида диаграмм. Из них наиболее важной для имитационного моделирования является диаграмма IDEF3, предназначенная для детального представления структуры бизнес-процесса. Основные объекты нотации IDEF3 приведены в таблице 1.

### Моделирование в системе Arena

Система Arena, разработанная компанией Systems Modeling Corporation, предназначена для имитационного моделирования вероятностных объектов различного функционального назначения. Первая версия этой системы увидела свет в 1993 г. Основу системы Arena составляют: транслятор языка моделирования SIMAN и система анимации Cinema Animation. Транслятор с языка SIMAN, посту-

пил в продажу в 1982г.; анимационная система Cinema animation - в 1984 г.

**Таблица 1 – Основные объекты IDEF3**

Описание	Графич. пред-ставл.
Модель работы (UOW). Объект служит для описания функций, выполняемых подразделениями	
Ссылочный объект. Объект для описания ссылок на другие диаграммы модели, циклические переходы в рамках одной модели, различные комментарии к функциям.	
Логическое «И». Логический оператор, определяющий связи между функциями в рамках процесса.	
Логическое «ИЛИ». Логический оператор, определяющий связи между функциями в рамках процесса.	
Логическое исключаящее «ИЛИ». Логический оператор, определяющий связи между функциями в рамках процесса.	
Стрелка предшествования. Соединяет последовательно выполняемые функции.	
Стрелка отношения. Используется для привязки к функциям объектов-комментариев.	
Стрелка потока объектов. Показывает поток объектов от одной функции к другой.	

Процесс моделирования организован следующим образом. Сначала пользователь строит в визуальном редакторе системы Arena блок-схему модели, состоящую из совокупности соединённых между собой модулей. Затем система генерирует по ней соответствующий код на языке SIMAN, после чего автоматически запускается система Cinema animation. Визуальная модель включает следующие основные модули: источники (Create), стоки (Dispose), процессы (Process) и очереди (Queue). Источники - это модули, генерирующие в модель динамические объекты называемые сущностями, (аналогичные объектам в системе GPSS W называются транзактами). Скорость поступления транзактов от источника обычно задается статистическим законом. Стоки - это модули для вывода транзактов из системы. Процессы - это модули выполнения работ с заданной производительностью (временем). Перед процессами могут возникать очереди транзактов на обслуживание. Отметим, что в системе Arena имеется возможность использования структурной схемы моделируемого объекта в виде диаграммы IDEF3, полученной в системе BPwin, с детализацией процессов функционирования элементов модели с помощью совокупности меню.

Для составления блок-схем в системе ARENA используется набор, из восьми основных модулей, из которых строится визуальная модель; шести модулей данных (Data Modules), представляющих собой наборы данных об объектах модели в виде электронных таблиц, которые определяют та-

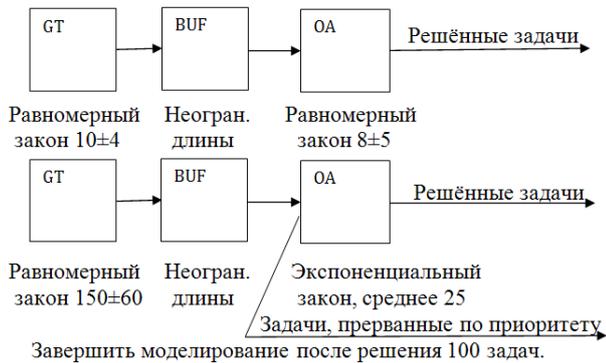
кие характеристики как ресурсы и очереди; и трёх шаблонов, содержащих информацию о расписании функционирования модели. Основные объекты системы Arena приведены в таблице 2.

**Таблица 2 – Основные объекты системы ARENA**

Описание	Графическое представление
Присвоение. Модуль присвоения новых значений переменным	
Группировка. Модуль группировки сущностей (транзактов)	
Создание Модуль генерации входящих сущностей	
Решение. Модуль введения условий движения сущностей	
Уничтожение. Модуль вывода сущностей из модели	
Обработка. Модуль, определяющий процесс обработки	
Запись. Модуль сбора статистических данных	
Разделение. Модуль копирования сущностей	
Объект. Модуль данных, определяющий тип объекта	
Очередь. Модуль данных, определяющий параметры очередей	
Ресурсы. Модуль данных, определяющий параметры ресурсов модели	
Расписание. Модуль данных, определяющий время создания сущностей и использования ресурсов	
Набор. Модуль данных, определяющий наборы ресурсов и объектов	
Переменная. Модуль данных, определяющий размерность переменной и её первоначальное значение	Variable
Исключения календаря. Шаблон, определяющий расписание отсутствия ресурсов в процессе моделирования	Calendar Exceptions
Расписание. Шаблон, определяющий расписание наличия ресурсов в процессе моделирования	Time Pattern
Состояния календаря. Шаблон, определяющий имена объектов, которые можно использовать вместо их числовых значений	Calendar States

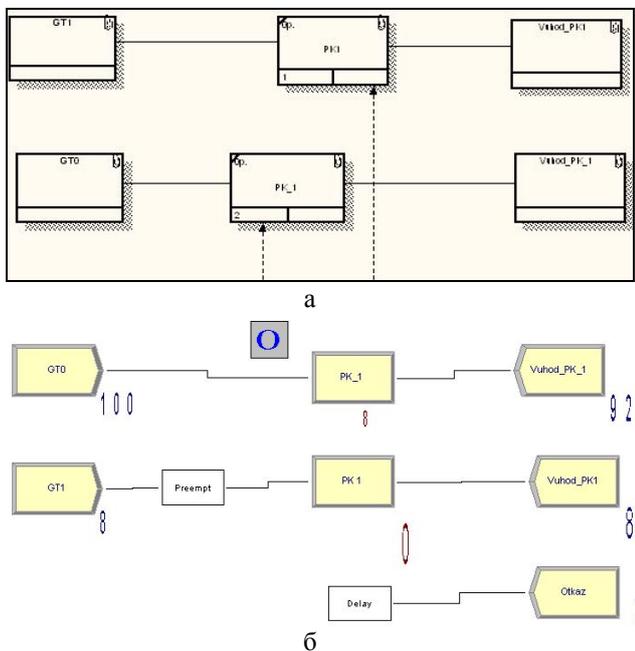
**Модель 1.** СМО с транзактами двух приоритетов.

Структурная схема примера приведена на рис. 1.



**Рис. 1 - Структурная схема модели 1**

На рис. 2 а) приведена диаграмма IDEF3 модели 1, полученная в системе BPwin.



**Рис. 2 - Диаграмма IDEF3 примера 2 в системе BPwin (а); Структурная схема модели 1 в системе Arena (б)**

В рассматриваемом примере впервые встретился модуль приоритетного обслуживания транзактов *Preempt*. Указывается название блока, приоритет, имя ресурса, который будет немедленно занят более приоритетным транзактом и метка (*Destination*), в которой указывается имя блока, в который поступит прерванный транзакт с меньшим приоритетом.

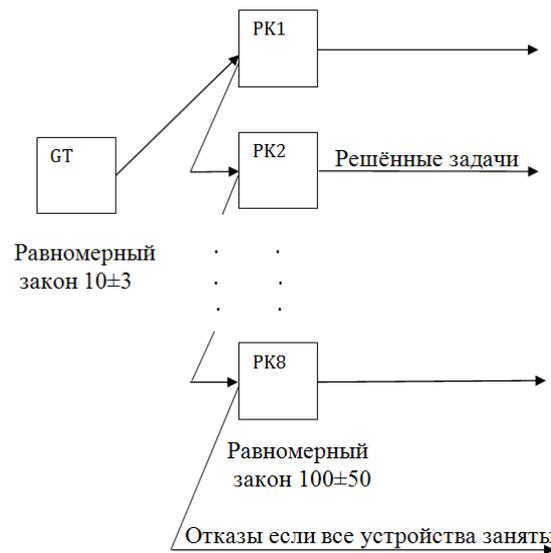
После подготовки модели в BPWIN, для проведения имитационного моделирования необходимо экспортировать ее в программный пакет Agena и запустить моделирование командой *Run/Go*. После завершения моделирования выдётся структурная схема, приведённая на рис.2 б).

По структурной схеме модели 1, приведённой на рис.1, и результатам моделирования можно

сделать следующие выводы. Было сгенерировано 100 транзактов с нулевым приоритетом, 92 из которых были обслужены и 8 приоритетных транзактов, обслуженных в полном объеме. Количество транзактов, обслуживание которых было прервано составило 7. Один транзакт с нулевым приоритетом остался на обслуживании в момент окончания моделирования. Среднее количество транзактов с нулевым приоритетом в очереди – 0.4122. Среднее время ожидания транзактов в очереди составило 4.1143 единиц модельного времени. Среднее время обслуживания транзакта составило 8.2704 часов, максимальное – 29.5469 часов, минимальное – 0.0 часов. Среднее время пребывания транзакта в системе – 12.0894 часов, максимальное – 33.6289 часов, минимальное – 0.0. Коэффициент занятости устройства составил - 0.8865. Среднее количество транзактов в системе – 1.2987.

**Модель 2.** Выбор устройства по правилу «первый свободный с наименьшим номером», если все устройства заняты транзакт получает отказ.

Структурная схема примера представлена на рис. 3.



Завершить моделирование после вывода из модели 100 транзактов.

**Рис. 3 - Структурная схема модели 2**

На рис.4 а) приведена структурная схема модели 2 в системе BPwin. При построении модели примера 3 для реализации всех устройств, использовался модуль *Set*. Он позволяет реализовать группу ресурсов, выбор которых может происходить по определенным правилам.

Необходимо обозначить его в блоке *Process*, далее обозначить группу ресурсов, входящую в данный модуль. Для проведения имитационного моделирования модель из BPWIN экспортируется в Agena (рис. 4 б))

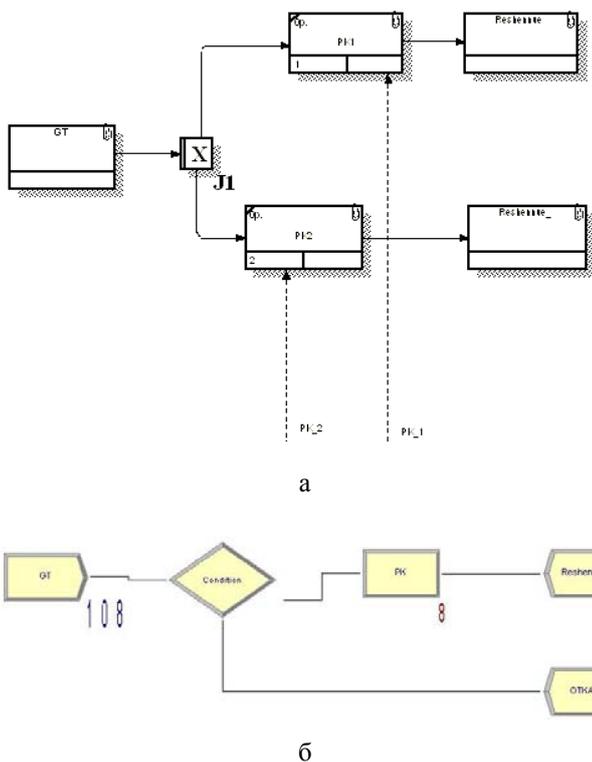


Рис. 4. - Структурная схема примера 3 в системе BPWin (а); Структурная схема примера 3 в системе Arena (б)

Приведём запись задания параметров модуля *Xor*, используемого для проверки наличия свободных устройств в системе *BPwin*:

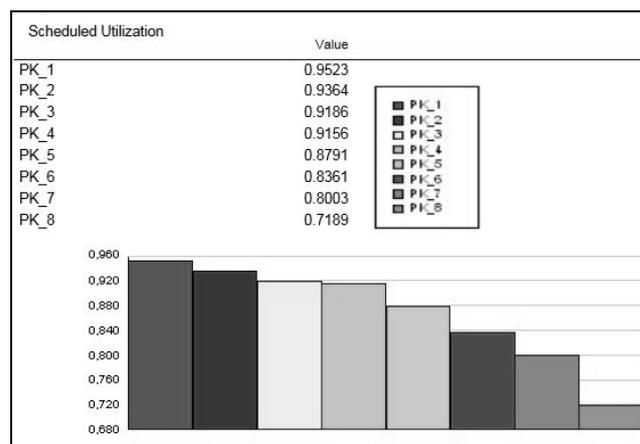
```
STATE(PK_1) == IDLE_RES //
STATE(PK_2) == IDLE_RES // STATE(PK_3) ==
IDLE_RES // STATE(PK_4) == IDLE_RES //
STATE(PK_5) == IDLE_RES // STATE(PK_6) ==
IDLE_RES // STATE(PK_7) == IDLE_RES //
STATE(PK_8) == IDLE_RES
```

Согласно структурной схеме, приведённой на рис.4 б) и отчету констатируем, что за время моделирования всего было сгенерировано 108 транзактов, 72 из них были обслужены устройствами PK1 - PK8, 28 получили отказ. PK1 обслужил 11 транзактов. Кроме того, 8 транзактов остались на обслуживании на момент окончания моделирования.

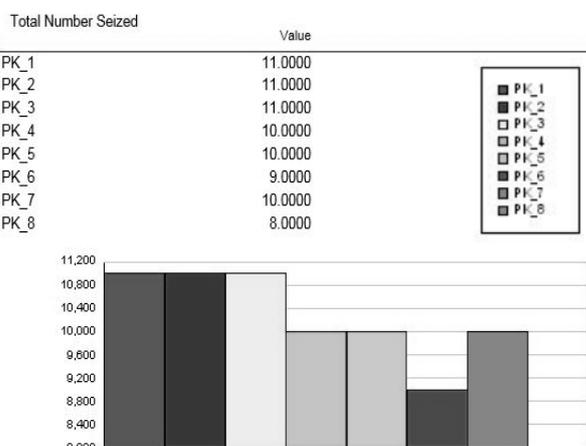
Диаграмма коэффициентов использования устройств приведена на рис.5 (а), диаграмма количества транзактов, занимавших устройства - на рис.5 (б).

Среднее количество транзактов в очереди устройства и среднее время ожидания транзактов в очереди составило 0 единиц модельного времени. Среднее время обслуживания транзакта составило 71.6658 часов, максимальное – 149.87 часов, минимальное – 0.0 часов. Среднее время пребывания транзакта в системе – 71.6658 часов, максимальное – 149.87 часов, минимальное – 0.0. Коэффициент занятости устройств колебался в диапазоне 0.7189 до

0.9523. Среднее количество транзактов в системе – 6.9575.



а



б

Рис. 5 - Коэффициенты использования устройств (а); Количество транзактов, поступавших в устройства (б)

По результатам моделирования отметим, что в программе для неприоритетных транзактов для имитации очереди использована память с именем BUF, а для приоритетных – очередь с тем же именем. Всего в модели обслужено 89 неприоритетных транзактов и 6 приоритетных. Обслуживание 5 неприоритетных транзактов прервано и они выведены из системы без обслуживания. Всего до завершения моделирования из системы выведено 100 транзактов.

Для проверки корректности работы модуля *Set* дополнительно построена структурная схема, в которой отдельно отображено каждое устройство, приведённая на рис. 6.

Нужно отметить, что отчет, полученный после прогона модифицированной модели, был идентичен представленному выше отчету исходного варианта.

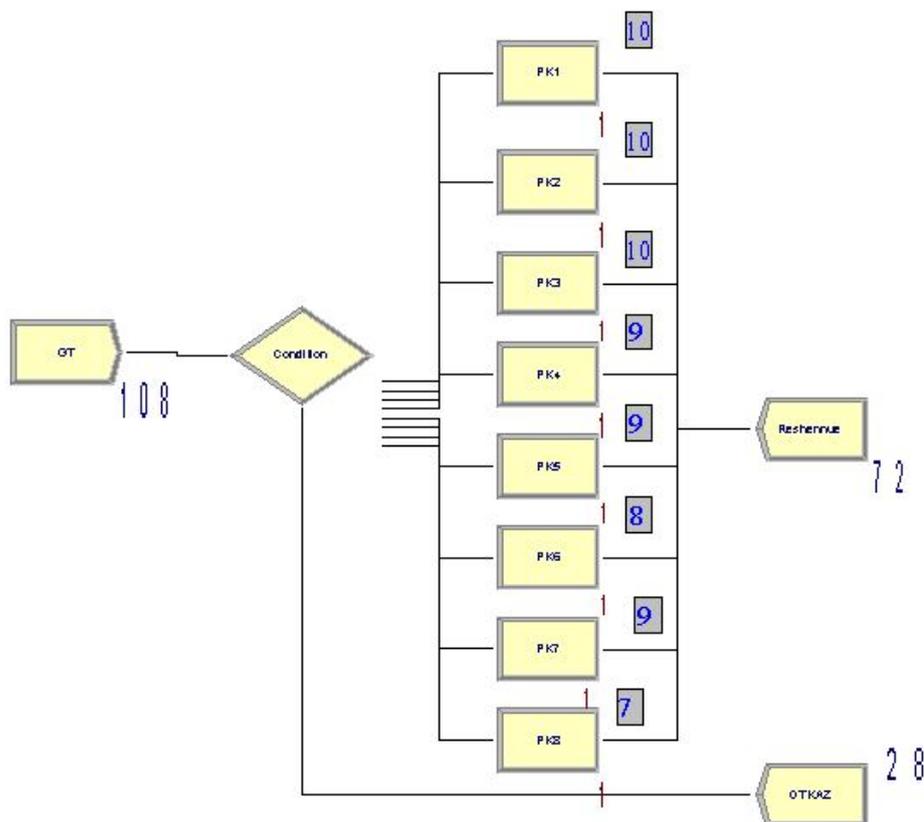


Рис. 6 - Детализированная структурная схема примера 3 в системе *Arena*

### Выводы

Имитационное моделирование сложных систем и бизнес-процессов в системе BPwin-Arena по сравнению с системой GPSS W с расширенным редактором имеет следующие достоинства.

1. Система BPwin имеет более широкое распространение для моделирования бизнес-процессов, чем система GPSS W. Разработанные в последнее время программные средства перехода из системы BPwin в систему Arena повысили привлекательность применения системы BPwin-Arena для имитационного моделирования.

2. Освоение имитационного моделирования в системе BPwin-Arena сравнительно несложно особенно для специалистов по структурному моделированию бизнес-процессов в системе BPwin.

3. Структурные модели в системе BPwin-Arena более наглядны и более приближены к предметной области, чем в системе GPSS W с расширенным редактором.

4. Наличие в системе BPwin-Arena шаблонов позволяет сравнительно несложно моделировать бизнес-процессы с учётом конкретных календарных сроков выполнения операций.

Недостатки имитационного моделирования бизнес-процессов в системе BPwin-Arena по сравнению с системой GPSS W с расширенным редактором:

1. Некоторые процедуры, встречающиеся в обработке данных в информационных системах, такие как прерывания по приоритету, прерывания по установлению режима недоступности и некото-

рые другие вызывают определённые трудности моделирования стандартными средствами.

2. Язык SIMAN, который можно использовать для расширения возможностей системы BPwin-Arena более сложный для освоения чем язык GPSS W, также как и процедура введения новых возможностей в систему BPwin-Arena чем в систему GPSS W с расширенным редактором.

Приведённые достоинства и недостатки не являются основанием для отказа от одной из этих систем. Систему BPwin-Arena будем рекомендовать для применения специалистам по исследованию бизнес-процессов в экономике, а систему GPSS W с расширенным редактором специалистам по информатике и вычислительной технике.

В КНИТУ – КАИ подготовлены учебные пособия по ИМ в системе GPSS W с расширенным редактором для студентов второго курса и в системе BPwin-Arena для студентов пятого курса.

### Литература

1. И.М. Якимов, В.В. Мокшин, А.П. Кирпичников, *Системы структурного и имитационного моделирования бизнес-процессов*. Казань: Изд-во «Фэн» Наука, 5, С. 203-236 (2013).
2. И.М. Якимов, Ю.Г. Старцева, *Применение системы имитационного моделирования GPSS WORLD с расширенным редактором для обучения в вузе*. Казань: Изд-во «Фэн» Академии наук РТ, 1, С. 367-371 (2013).
3. И.М. Якимов, *Компьютерное моделирование. Учебное пособие*. Казань, Изд-во Казанского гос. технич. ун-та, 2008. 220 с.
4. Б.Я. Советов, С.А. Яковлев, *Моделирование систем. Учебник* М., Высшая школа, 2005. 371 с.

5. А.П. Кирпичников, *Прикладная теория массового обслуживания*. Казань: Изд-во Казанского гос. ун-та, 2008. 118 с.
6. А.П. Кирпичников, *Методы прикладной теории массового обслуживания*. Казань, Изд-во Казанского университета, 2011. 200 с.
7. И.М. Якимов, Р.З. Бетретдинов, *Моделирование и оптимизация процессов разработки систем программного обеспечения*. Вестник Казан. технол. ун-та, **15**, 18, С. 261-265 (2012).
8. С. Аун, Л.М. Шарнин, А.П. Кирпичников, *Информационно-измерительная система слежения за движущимися объектами*. Вестник Казан. технол. ун-та, **14**, 16, С. 224-232 (2011).
9. В.В. Мокшин, И.М. Якимов, *Метод формирования модели анализа сложной системы* Информационные технологии. М., Изд-во новые технологии, 5 С. 46-51 (2011).
10. В.В. Мокшин, А.П. Кирпичников, Л.М. Шарнин, *Отслеживание объектов в видео потоке по значимым признакам на основе фильтрации частиц*. Вестник Казан. технол. ун-та, **16**, 18, С. 297-303 (2013).
11. М.А. Степанова, А.С. Сытник, А.П. Кирпичников, В.В. Мокшин, *Оптимизация процесса ремонта грузоподъемных машин по математической модели*, Вестник Казан. технол. ун-та, **16**, 20, С. 309-314 (2013).
12. В.В. Мокшин, И.М. Якимов, Р.М. Юльметьев, А.В. Мокшин, *Рекурсивно-регрессионная самоорганизация моделей анализа и контроля сложных систем*, Нелинейный мир, 1, С. 48-63 (2009).

---

© **И. М. Якимов** – проф. каф. автоматизированных систем обработки информации и управления КНИТУ-КАИ; **А. П. Кирпичников** – д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. интеллектуальных систем и управления информационными ресурсами КНИТУ, kirpichnikov@kstu.ru; **В. В. Мокшин** – канд. тех. наук, доц. каф. автоматизированных систем обработки информации и управления КНИТУ-КАИ, vladimir.mokshin@mail.ru; **Г. В. Костюхина** – магистр той же кафедры, galechka-92@mail.ru; **Т. А. Шигаева** – асп. той же кафедры.