

## РЕАЛИЗАЦИЯ ЭВОЛЮЦИОННО-ИМИТАЦИОННОГО АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Антонова А.С.<sup>1</sup>, Аксенов К.А.<sup>1</sup>, Ростунцев С.Д.<sup>1</sup>, Рудь А.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), e-mail: wiper99@mail.ru

В статье описана реализация эволюционно-имитационного алгоритма в системе моделирования процессов металлургического предприятия. В основе алгоритма лежит метод мультиагентной генетической оптимизации, предложенный авторами в предыдущих работах. Метод мультиагентной генетической оптимизации предназначен для решения оптимизационных задач, целевая функция которых не формализуется аналитически. Эволюционно-имитационный алгоритм был реализован на языке Java в модуле оптимизации процессов предприятия автоматизированной системы выпуска металлургической продукции. Алгоритм был протестирован при решении задачи оптимизации логистических процессов выпуска металлургической продукции. В ходе тестирования алгоритма были получены рекомендации для пользователя по настройке параметров работы алгоритма. Для достижения быстрой сходимости алгоритма при сохранении точности результата необходимо использовать число хромосом в поколении в размере не менее 6 хромосом и останавливать работу алгоритма при смене не менее чем 10 поколений.

Ключевые слова: эволюционное моделирование, имитационное моделирование; логистические производственные процессы, автоматизированная информационная система.

## AN IMPLEMENTATION OF THE EVOLUTIONARY-SIMULATION ALGORITHM OF THE PROCESSES OPTIMIZATION IN THE SIMULATION SYSTEM OF THE METALLURGICAL PROCESSES

Antonova A.S.<sup>1</sup>, Aksyonov K.A.<sup>1</sup>, Rostuntcev S.D.<sup>1</sup>, Rud A.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University n.a. the first president of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia (620002, Yekaterinburg, street Mira, 19), e-mail: wiper99@mail.ru

The article describes the implementation of an evolutionary-simulation algorithm in the simulation system of the metallurgical enterprises processes. The algorithm is based on the multi-agent genetic optimization method proposed by the authors in previous works. The multi-agent genetic optimization method is intended to solve optimization problems where the objective function is not formalized analytically. The evolutionary-simulation algorithm has been implemented on Java in the optimization module of the metallurgical enterprise information system. The algorithm has been tested in solving the problem of optimization of the logistics processes of the steel products manufacture. During algorithm testing, recommendations have been obtained for the user to configure the parameters of the algorithm. To achieve the rapid convergence of the algorithm, while maintaining the accuracy of the result, it is necessary to use the number of chromosomes in the generation of at least 6 chromosomes and stop the algorithm when changing at least 10 generations.

Keywords: evolutionary modeling; simulation; logistical production process; automated information system.

Металлургическое предприятие с точки зрения анализа протекающих в нем процессов представляет собой сложную организационно-техническую систему, состоящую из большого числа разнородных, взаимозависимых элементов, среди которых исследователи выделяют в отдельный класс группу лиц, принимающих решения. Решение логистических или организационных задач в подобных системах невозможно без применения компьютерной поддержки, при этом имитационное моделирование становится наиболее эффективным способом изучения поведения и существенных свойств системы. Применение методов эволюционного моделирования к изучению свойств и поведения сложных систем позволяет

использовать естественные законы развития подобных систем для решения оптимизационных задач с помощью генерации и оценки альтернативных вариантов функционирования систем.

Эволюционное моделирование (ЭМ) – хорошо известная и эффективная оптимизационная методология, которую применяют для решения различных задач в науке и технике. Она основана на аналогии с естественными процессами селекции, генетическими преобразованиями и воспроизведением потомства, протекающими в природе. В нашей стране методология ЭМ применительно к решению оптимизационных задач, возникающих в сложных организационно-технических системах, активно развивается научной школой Курейчика В.В. [5; 6]. В популярных системах имитационного моделирования (AnyLogic, Simio, Arena) оптимизация моделируемых процессов осуществляется за счет использования оптимизатора OptQuest, реализующего, в том числе, методы эволюционного моделирования [7]. Существенным ограничением возможностей работы оптимизатора OptQuest на «тяжелых» моделях является этап загрузки данных и генерации первичной структуры модели, сопряженный со значительными временными затратами на каждой итерации и, как следствие, снижением скорости перебора вариантов. Вариантом решения этой проблемы может быть реализация «пользовательского» (нестандартного) эксперимента средствами используемого в системе моделирования ЯВУ (например, Java, C#). Применение подобного варианта сопряжено с требованиями по наличию навыков программирования у аналитика, оптимизирующего производственные процессы. Кроме того, к недостаткам оптимизатора OptQuest можно отнести непрозрачность работы оптимизатора: отсутствие выбора метода оптимизации и настройки параметров работы метода.

Актуальной является разработка гибридного эволюционно-имитационного алгоритма оптимизации процессов и его реализация в модуле оптимизации процессов предприятия (ОПП) автоматизированной информационной системы моделирования производственных процессов (АИС МОД). АИС МОД является подсистемой системы выпуска металлургической продукции (АС ВМП), представляющей собой web-ориентированную систему, предназначенную для слежения, контроля, моделирования, анализа и совершенствования процессов выпуска металлургической продукции [1; 8; 9].

### **Реализация эволюционно-имитационного алгоритма**

Эволюционно-имитационный алгоритм, реализуемый в модуле ОПП АИС МОД, основан на методе мультиагентной генетической оптимизации, подробно описанном в работах [2; 3]. Рассмотрим этапы реализации алгоритма в модуле ОПП.

Этап 1. Выбор способа кодирования оцениваемого альтернативного решения задачи в особь-хромосому. Под особью (хромосомой) будем понимать строку символов, кодирующую

некоторое решение оптимизационной задачи. Под решением оптимизационной задачи (не обязательно оптимальным, но допустимым) понимается набор значений  $M$  входных управляемых параметров системы. Данные значения согласно некоторому правилу (способу кодирования) должны быть закодированы в строку символов – особь (хромосому). Отдельный символ хромосомы называется геном (всего ген в хромосоме  $Q$ ). Число  $N$  хромосом образуют популяцию хромосом (популяцию особей). Методы ЭМ работают с популяцией особей и с каждым шагом изменяют ее с целью нахождения лучшей особи. Пригодность (оптимальность) особи оценивается ее функцией пригодности (ФП). ФП рассчитывается для каждой особи исходя из оценки с помощью имитационной модели последствий реализации решения, закодированного в рассматриваемой особи.

Рассмотрим реализуемый способ декодирования хромосом. Введем следующие индексы:  $i \in \{1, \dots, M\}, k \in \{1, \dots, N\}$ . Будем использовать следующие обозначения:  $D_i = [a_i; b_i]$  – диапазон изменения значения управляемого параметра  $P_i$ ;  $\Delta_i = 0 - a_i$  – смещение диапазона значений параметра  $P_i$ ;  $D_i' = [a_i + \Delta_i; b_i + \Delta_i]$  – нормированный диапазон изменения значения управляемого параметра  $P_i$ ;  $q_i$  – количество ген, необходимое для двоичной записи верхней границы нормированного диапазона  $D_i'$  изменения значения управляемого параметра  $P_i$ ;  $\sum q_i = Q$ . Пусть текущая популяция состоит из  $N$  строк, заполненных 0 и 1:  $S = \{S_1, \dots, S_N\} : S_k = \{\beta_0^k, \beta_1^k, \dots, \beta_{Q-1}^k\}, \beta \in \{0, 1\}$ . Рассмотрим реализуемый алгоритм декодирования набора строк  $S$  в набор управляемых параметров  $P = \{P_{i,k}\}$ .

a.  $k=1$

b. Разбиение строки  $S_k$  на  $M$  подстрок размером  $q_i$  каждая  $S_k = \{SS_1^k, \dots, SS_M^k\}, SS_i^k = \{\lambda_0^{i,k}, \lambda_1^{i,k}, \dots, \lambda_{q_i-1}^{i,k}\}$ , где

$$\forall t \in \{0, \dots, q_i - 1\} \quad \lambda_t^{i,k} = \begin{cases} \beta_t^k, & \text{если } i = 1, \\ \beta_{t'}^k, & t' = t + \sum_{r=1}^{i-1} q_{i-r}, \text{ если } i \neq 1. \end{cases}$$

c. Декодирование каждой подстроки  $SS_i^k$  строки  $S_k$  в значение параметра  $P'_{i,k}$ :

$$P'_{i,k} = \sum_{t=0}^{q_i-1} (\lambda_t^{i,k} \cdot 2^t).$$

d. Преобразование параметров  $P'_{i,k}$  в параметры  $P_{i,k}$  по формуле:

$$P_{i,k} = P'_{i,k} - \Delta_i.$$

e. Проверка выполнения условия  $a_i \leq P_{i,k} \leq b_i$  для всех  $i$ . Если условие выполнено, то переход на шаг g. Если условие не выполнено для некоторых  $i$ , то формирование случайным образом новой строки  $S_k$ , переход на шаг b.

f. Если  $k < N$ , то  $k = k + 1$  и переход на шаг b, иначе переход на шаг g.

g. Конец декодирования.

Этап 2. Разработка операторов изменений особей-хромосом (генетических операторов). В результате работы генетических операторов меняется символьная строка, кодирующая решение, следовательно, меняется и решение задачи, представленной данной строкой. Применение генетических операторов к текущей популяции особей позволяет получить новую популяцию особей. Декодирование особей новой популяции приводит к формированию набора новых решений поставленной задачи. В качестве генетических операторов были использованы стандартные операторы: оператор кроссинговера, оператор мутации и оператор инверсии [6]. Для каждого оператора предполагается задание пользователем вероятности его применения.

Этап 3. Определение законов выживания решения (законов селекции или отбора решений-хромосом в следующую популяцию). В качестве закона отбора решения в следующую популяцию был реализован закон рулетки [6]. Согласно данному закону каждому решению ставится в соответствие вероятность его отбора, связанная с ФП решения (чем выше ФП, тем выше вероятность отбора решения).

Этап 4. Выбор способа генерации начальной популяции и способа останова работы алгоритма. Генерация начальной популяции реализована случайным образом. Способ останова алгоритма выбран по достижению заданного пользователем числа популяций.

Этап 5. Реализация лежащего в основе гибридного алгоритма метода мультиагентной генетической оптимизации на языке Java.

Этап 6. Реализация интерфейса взаимодействия пользователя с эволюционно-имитационным алгоритмом.

Пользователь в ходе взаимодействия с эволюционно-имитационным алгоритмом задает: параметры работы алгоритма (число хромосом в популяции, число популяций как признак останова работы алгоритма, вероятности применения генетических операторов мутации и инверсии), входные параметры имитационной модели и диапазоны их изменения, выходной параметр имитационной модели для расчета ФП решений, длительность моделирования (количество тактов модельного времени).

### **Отладка эволюционно-имитационного алгоритма**

Рассмотрим отладку реализованного гибридного эволюционно-имитационного алгоритма на примере решения задачи оптимизации логистических процессов выпуска металлургической продукции (ВМП). Рассматриваемые процессы связаны с движением единиц продукции (ЕП) по агрегатам конвертерного и прокатного производства и дальнейшей погрузкой ЕП со склада готовой продукции в подвижной состав, приходящий раз в сутки. Детальная постановка задачи приведена в [4]. Необходимо определить оптимальное соотношение количества вагонов подвижного состава и интенсивности

генерации заявок на производство ЕП с целью минимизации среднего времени простоя поданных вагонов  $T$  перед погрузкой и минимизации объема склада готовой продукции  $V$ . Количество вагонов меняется в пределах от 4 до 20 штук; интенсивность генерации заказов на производство меняется в диапазоне от 1 мин до 15 мин с шагом 1 мин. Время моделирования – 3000 минут. Для решения данной задачи в модуле создания моделей процессов (СМП) АИС МОД была разработана имитационная модель процессов ВМП, описание которой приведено в [4]. Данная модель была модифицирована с целью расчета на выходе модели характеристик  $T$  и  $V$ . В результате был описан выходной параметр «Выход модели»  $Out$ , рассчитываемый следующим образом (с учетом максимизации данного ресурса):  $Out = Round(1000000 / (T + 10 \cdot V))$ . Структура модели приведена на рис. 1.

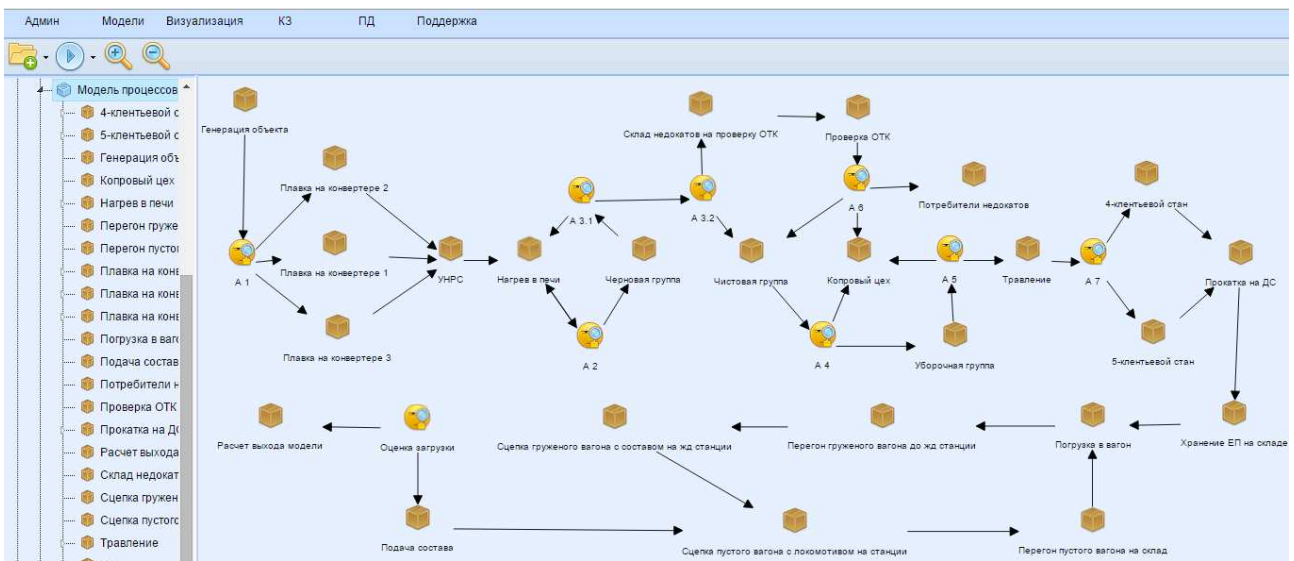


Рис. 1. Структура имитационной модели процессов ВМП в модуле СМП АИС МОД.

В результате работы эволюционно-имитационного алгоритма было получено следующее решение: для минимизации среднего времени простоя поданных вагонов  $T$  перед погрузкой и минимизации объема склада готовой продукции  $V$  необходимо обеспечить интенсивность генерации заказов на производство с периодичностью раз в 15 минут и количество вагонов подвижного состава в количестве 14 штук. Данное решение соответствует следующим значениям выходных характеристик решаемой задачи:  $T=699$  мин,  $V=10$  шт. Информация, введенная пользователем для работы эволюционно-имитационного алгоритма, и результат работы алгоритма, формируемый модулем ОПП АИС МОД, представлены на рис. 2.

**Редактирование плана**

Наименование:  Число хромосом:

Количество тактов:  Число популяций:

**Вероятность применения оператора мутации** от:  до:

**Вероятность применения оператора инверсии** от:  до:

**Выходной параметр**

Наименование параметра:  Оптимальное значение:

**Входные параметры**

Наименование параметра	Минимальное значение	Максимальное значение	Оптимальное значение
Количество вагонов, шт.	4	20	14
Интенсивность генерации ЕП, мин	1	15	15

Рис. 2. Интерфейс эволюционно-имитационного алгоритма в модуле ОПП АИС МОД.

По окончании работы эволюционно-имитационного алгоритма был сформирован файл с расширением .xlsx, содержащий подробную информацию о ходе решения оптимизационной задачи. На основании анализа данного файла были построены зависимости максимального, минимального и среднего значений ФП хромосом от номера популяции, представленные на рис. 3. Как следует из рисунка, с ростом номера популяции среднее значение ФП имеет тенденцию к возрастанию, максимальное значение ФП возрастает незначительно, а минимальное значение ФП подвержено сильным колебаниям. Последнее обстоятельство обеспечивает каждую новую популяцию генетическим разнообразием для поиска новых решений и выхода из локального оптимума.

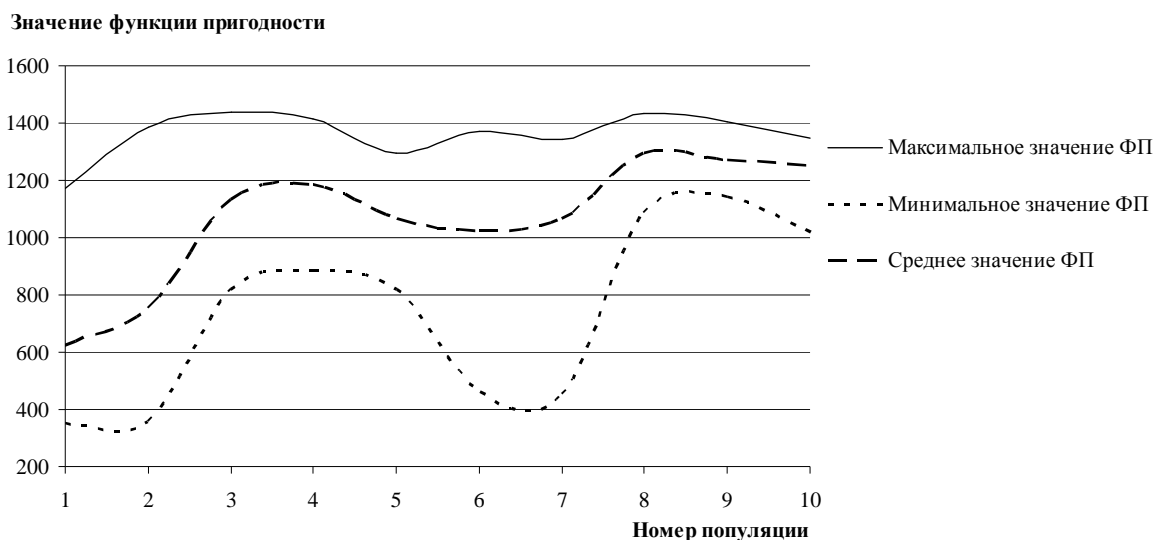


Рис. 3. Зависимость значений ФП от номера популяции в ходе решения задачи.

Работа эволюционно-имитационного алгоритма была проанализирована при смене числа хромосом в популяции и смене числа поколений (предельного числа популяций). Была проанализирована зависимость процента решений, не удовлетворяющих ограничению на принадлежность управляемого параметра  $P_i$  решению диапазону  $D_i$  изменения значений данного параметра (рис. 4, левый график). Также была проанализирована зависимость процента решений с высокой ФП, т.е. с ФП, отличной от найденной максимальной ФП не более чем на 5% (рис. 4, правый график).

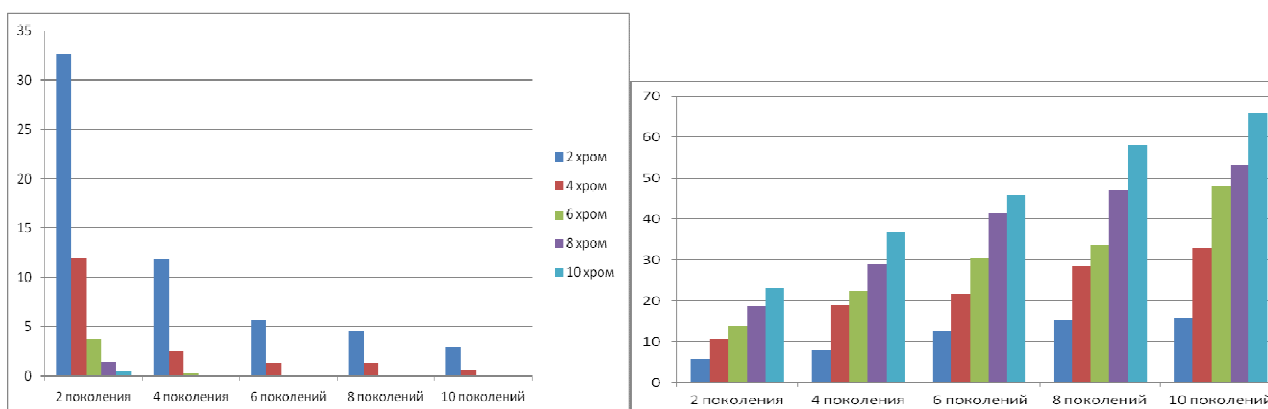


Рис. 4. Зависимость процента не удовлетворяющих ограничениям решений (слева) и процента решений с высокой ФП (справа) от числа поколений и числа хромосом в поколении.

Как следует из анализа графиков, приведенных на рис. 4, увеличение числа поколений снижает процент не удовлетворяющих ограничениям решений, что связано с закреплением в каждом последующем поколении удовлетворяющих ограничениям решений. Зависимость процента не удовлетворяющих ограничениям решений от роста числа хромосом в поколении незначительна при применении числа хромосом не менее 6. Одновременное увеличение числа поколений и числа хромосом в поколениях повышает процент решений с высокой ФП, что связано с повышением разнообразия генетического материала.

Таким образом, можно рекомендовать пользователю следующие настройки работы эволюционно-имитационного алгоритма: применение числа хромосом в поколении в размере не менее 6 хромосом и задание останова работы алгоритма при смене 10 поколений.

### Заключение

В ходе работы была решена задача реализации эволюционно-имитационного алгоритма оптимизации процессов в модуле ОПП системы моделирования производственных процессов металлургического предприятия АИС МОД АС ВМП. В указанном алгоритме реализован разработанный ранее метод мультиагентной генетической оптимизации.

Проведено тестирование гибридного алгоритма на примере решения задачи оптимизации логистических процессов выпуска металлургической продукции. Для данной задачи получено следующее решение: интенсивность генерации заказов на производство –

каждые 15 минут, количество вагонов подвижного состава – 14 штук. Проведена отладка работы алгоритма с целью настройки следующих параметров его работы: числа популяций и числа хромосом в популяции. По результатам тестирования выявлены рекомендации по настройке пользователем параметров эволюционно-имитационного алгоритма.

*Работа выполнена в рамках договора № 02.G25.31.0055 (проект 2012-218-03-167) при финансовой поддержке работ Министерством образования и науки Российской Федерации.*

### Список литературы

1. Аксенов К.А., Антонова А.С., Спицина И.А., Сысолетин Е.Г., Аксенова О.П. Разработка автоматизированной системы анализа, моделирования и принятия решений для металлургического предприятия на основе мультиагентного подхода // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 7. – С. 49-53.
2. Антонова А.С., Аксенов К.А. Генетическая оптимизация при решении задачи планирования проектных работ // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. - URL: <http://www.science-education.ru/106-7409> (дата обращения: 13.11.2012).
3. Антонова А.С., Аксенов К.А. Применение мультиагентного и эволюционного моделирования при планировании работ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2013. - № 6 (186). - С. 126-136.
4. Антонова А.С., Аксенов К.А., Клебанов Б.И., Киселева М.В., Быков Е.А. Анализ систем имитационного моделирования на примере задачи разработки модели технологической логистики // Современные проблемы науки и образования. – 2013. - № 6. - URL: <http://www.science-education.ru/113-11342>.
5. Бионические информационные системы и их практические применения / под ред. Л.А. Зинченко, В.М. Курейчика, В.Г. Редько. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 288 с.
6. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.
7. Оптимизатор OptQuest [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.opttek.com/OptQuest> (дата обращения: 13.11.2012).
8. Aksyonov K.A., Bykov E.A., Aksyonova O.P., Antonova A.S. Development of real-time simulation models: integration with enterprise information systems // Proceedings of ICCGI 2014: The Ninth International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology, 22-26 June 2014, Sevilla, pp. 45-50.



9. Borodin A., Kiselev Y., Mirvoda S, and Porshnev S. On design of domain-specific query language for the metallurgical industry // Proceedings of 11th Int. Conference BDAS 2015: Beyond Databases, Architectures and Structures: Communications in Computer and Information Science, 26-29 May 2015, Ustron, vol. 521, pp. 505-515.

**Рецензенты:**

Доросинский Л.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург;

Поршнеv С.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники информационных систем, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.