

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РАСКРОЯ СЛЯБОВ НА МАШИНЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Антонова А.С.¹, Аксенов К.А.¹

¹ФГАОУ ВПО «Уральский Федеральный Университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19), e-mail: bpsim.dss@gmail.com

В статье рассматривается разработка имитационной модели раскроя слябов на машине непрерывного литья заготовок. Имитационное моделирование применяется для оптимизации последовательности плавков, подаваемых на машину непрерывного литья заготовок. Целью оптимизации является снижение отклонений между расчетным и фактическим количеством слябов, поскольку подобные отклонения могут привести к срывам сроков заказа. Модель раскроя слябов разработана в модуле создания моделей процессов автоматизированной системы выпуска металлургической продукции. Модуль создания моделей процессов поддерживает имитационное, мультиагентное моделирование. Агенты в разработанной модели предназначены для описания алгоритма раскроя слябов, применяемого технологами на производстве. В результате проведения экспериментов с моделью было найдено следующее решение: необходимо подавать на машину непрерывного литья заготовок сначала плавки из стали обычного качества, затем плавки из высококачественной стали.

Ключевые слова: имитационное моделирование, агентное моделирование, машина непрерывного литья заготовок, автоматизированная информационная система, раскрой слябов.

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF CUTTING SLABS IN A CONTINUOUS CASTING MACHINE

Antonova A.S.¹, Aksyonov K.A.¹

¹Ural Federal University n.a. the first president of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia (620002, Yekaterinburg, street Mira, 19), e-mail: bpsim.dss@gmail.com

In the article the development of a simulation model of cutting slabs in a continuous casting machine is considered. Simulation modeling is used to optimize the sequence of the melts supplied to the continuous casting machine. The goal of optimization is to reduce the deviation between the estimated and actual numbers of slabs, because such deviations can lead to missed deadlines. The model of cutting slabs has been designed with the use of a processes models creation module of the metallurgical enterprise information system. The processes models creation module supports the simulation model creation and multi agent simulation. Agents in the developed model are intended to describe the cutting slabs algorithm used by technologists in the metallurgical production. As a result of experiments with the model the following solution has been found. The following sequence of melts should be supplied to the continuous casting machine: initially the melts from the usual quality steel, followed the melts from the high quality steel.

Keywords: simulation; agent-based modeling; continuous casting machine; automated information system; cutting slabs.

В металлургическом производстве особое внимание уделяется совершенствованию процесса непрерывной разливки с целью увеличения доли стали, производимой на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Эффективность работы МНЛЗ оказывает непосредственное влияние на качество и себестоимость производимой на последующих переделах продукции. При исследовании физико-механических процессов непрерывной разливки, влияющих на качество готовой продукции, широкое распространение получил метод математического моделирования [7]. При исследовании логистических и организационных бизнес-процессов непрерывной разливки хорошие результаты демонстрирует метод имитационного моделирования применительно к оптимизации

планирования производства [3,6]. Разработка имитационных моделей технологических процессов МНЛЗ, влияющих на качество готовой продукции, представляется актуальной.

Рассмотрим разработку модели раскроя слябов на МНЛЗ с помощью автоматизированной информационной системы моделирования процессов предприятия (АИС МОД) автоматизированной системы выпуска металлургической продукции (АС ВМП). АС ВМП представляет собой web-ориентированную систему, предназначенную для слежения, контроля, моделирования, анализа и совершенствования процессов выпуска металлургической продукции [1, 4, 5, 8].

Постановка задачи моделирования

Сталеразливочный ковш (стальковш) с плавкой после всех переделов, влияющих на химический состав стали, поступает на МНЛЗ, где жидкая сталь разливается, слиток охлаждается и разрезается на слябы. Промежуточный ковш (промковш) МНЛЗ обеспечивает распределение стали по ручьям, ее дозирование и позволяет непрерывно лить металл при замене пустого стальковша на полный. Металл в кристаллизаторах ручьев МНЛЗ охлаждается до образования тонкой стенки; дальше металл в виде слитка вытягивается в роликовый аппарат зоны вторичного охлаждения (ЗВО) ручьев МНЛЗ. Протягиваясь по роликовому аппарату ручья, слиток охлаждается системой водовоздушного охлаждения до температуры кристаллизации металла так, что в конце агрегата газорезкой ручья разрезается на слябы. Для работы газорезки в автоматическом режиме технологи применяют алгоритм раскроя слитка на слябы на границе плавков. При раскрое используется горячая мерная длина (ГМД) сляба, которая получается путем умножения заданной холодной мерной длины (ХМД) на коэффициент.

Замена стальковшей на МНЛЗ осуществляется посредством поворотного станда. В самом конце разливки плавки на поворотный станд устанавливается стальковш с новой плавкой. На пульт управления поступает информация о марке стали и плане порезки следующей плавки. При этом металл текущей плавки полностью выливается из стальковша в промковш. Станд разворачивается, и новый стальковш встает в рабочую позицию. После открытия шибера стальковша металл новой плавки поступает в промковш с остатками предыдущей плавки, соответственно, металл в промковше смешивается. С базового уровня приходит сигнал начала разливки стальковша (сигнал «начало новой плавки»), по этому сигналу фиксируется начало границы плавков. Для указанной границы начинает работать алгоритм раскроя слябов на границах плавков.

Рассмотрим работу двухручьевого МНЛЗ со следующими характеристиками: скорость вытягивания слитка из кристаллизатора $V_{\rho} - 0,8$ м/мин, длина кристаллизатора – 1 м, длина

зоны охлаждения – 50 м. Необходимо проанализировать работу МНЛЗ по разливу серии из 10 плавков. Каждая плавка i характеризуется следующими параметрами:

- массой стали в сталковше M^i , кг,
- маркой стали G^i (высококачественная сталь с плотностью $\rho_{cm}^i=7280$ кг/м³, сталь обычного качества с плотностью $\rho_{cm}^i=7850$ кг/м³),
- $XМД^i$, мм ($ГМД^i$ равна $XМД^i$ умножить на коэффициент 1,014),
- площадью сечения, получаемого после порезки сляба, $F=F^i=0,255$ м².

Скорость истечения стали из сталковша в промковш в кг/мин для двухручьевого МНЛЗ определяется по формуле:

$$W^i = 2 \cdot \rho_{cm}^i \cdot F \cdot v_{\rho} \quad (1)$$

Для каждого ручья при поступлении сигнала «Начало разливки плавки i по ручьям» происходит определение расчетной длины плавки i по ручью по формуле:

$$L_p^i = \frac{M^i}{2 \cdot \rho_{cm}^i \cdot F} \quad (2)$$

На рисунке 1 приведена схема раскроя отлитой плавки $i-1$ на слябы исходя из заданной $ГМД^{i-1}$ и сигнала начала новой плавки. Параметр L определяется замером согласно рисунку 1.

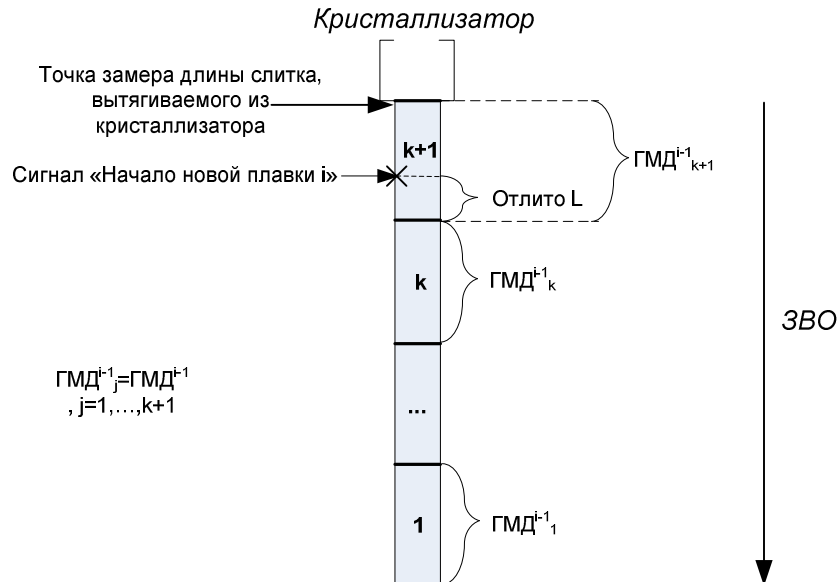


Рис. 1. Схема раскроя отлитой плавки $i-1$ на слябы исходя из заданной $ГМД^{i-1}$ и сигнала начала новой плавки

В таблице 1 приведен алгоритм раскроя слябов на границе плавков, применяемый технологами для определения фактического количества слябов K_{ϕ}^i плавки i . Расчетное

количество слябов K_p^i плавки i определяется как отношение расчетной длины плавки L_p^i к заданной горячей мерной длине слябов плавки $ГМД^i$.

Таблица 1

Алгоритм раскроя слябов на границе плавков

Тип перехода на границе плавков	Условие на параметр L	Решение
Плавка «худшая на лучшую» (марка стали плавки i хуже, чем марка стали плавки $i-1$)	$L \leq 200см$	В $(i-1)$ -ой плавке $(k-1)$ слябов с длиной $ГМД^{i-1}$. Сляб k с новой мерной длиной $ГМД^i$ будет первым в i -ой плавке.
	$L > 200см$	В $(i-1)$ -ой плавке k слябов с длиной $ГМД^{i-1}$. Сляб $(k+1)$ с новой мерной длиной $ГМД^i$ будет первым в i -ой плавке.
Плавка «равноценная» (марки стали плавков $i-1$ и i равноценны по качеству)	$L = 0см$	В $(i-1)$ -ой плавке $(k-1)$ слябов с длиной $ГМД^{i-1}$. Сляб k с новой мерной длиной $ГМД^i$ будет первым в i -ой плавке.
	$L > 0см$	В $(i-1)$ -ой плавке k слябов с длиной $ГМД^{i-1}$. Сляб $(k+1)$ с новой мерной длиной $ГМД^i$ будет первым в i -ой плавке.
Плавка «лучшая на худшую» (марка стали плавки i лучше, чем марка стали плавки $i-1$)	$(ГМД_{k+1}^{i-1} - L) \leq 600см$	В $(i-1)$ -ой плавке $(k+2)$ слябов с длиной $ГМД^{i-1}$. Сляб $(k+3)$ с новой мерной длиной $ГМД^i$ будет первым в i -ой плавке.
	$(ГМД_{k+1}^{i-1} - L) > 600см$	В $(i-1)$ -ой плавке $(k+1)$ слябов с длиной $ГМД^{i-1}$. Сляб $(k+2)$ с новой мерной длиной $ГМД^i$ будет первым в i -ой плавке.

Задание на оптимизацию процессов формулируется следующим образом: необходимо минимизировать суммарное число отрицательных и положительных отклонений в количестве слябов S , меняя последовательность подачи плавков на МНЛЗ. Суммарное число отклонений в количестве слябов будем определять по формуле:

$$S = 2 \cdot \sum_i |\Delta_{отриц}^i| + \sum_i \Delta_{полож}^i, \text{ где} \quad (3)$$

$\Delta_{отриц}^i$ – отрицательное отклонение в количестве слябов плавки i : $\Delta_{отриц}^i = K_{\phi}^i - K_p^i < 0$,

$\Delta_{полож}^i$ – положительное отклонение в количестве слябов плавки i : $\Delta_{полож}^i = K_{\phi}^i - K_p^i \geq 0$.

Разработка имитационной модели раскроя слябов на границе плавков МНЛЗ

На рисунке 2 представлена структура модели раскроя слябов в нотации мультиагентных процессов преобразования ресурсов (МППР) модуля создания моделей процессов (СМП) АИС МОД. Согласно нотации МППР [2, 9] узлы модели представляют собой либо агенты, либо операции. Агенты в модели раскроя слябов применяются для реализации логики работы с заявками (заказами на плавку) и управления значениями

атрибутов заявок. Операции в модели применяются для визуализации длительности работы элементов МНЛЗ по ручьям: кристаллизаторов (Кр1 и Кр2), зон вторичного охлаждения (ЗВО1 и ЗВО2) и газорезок.

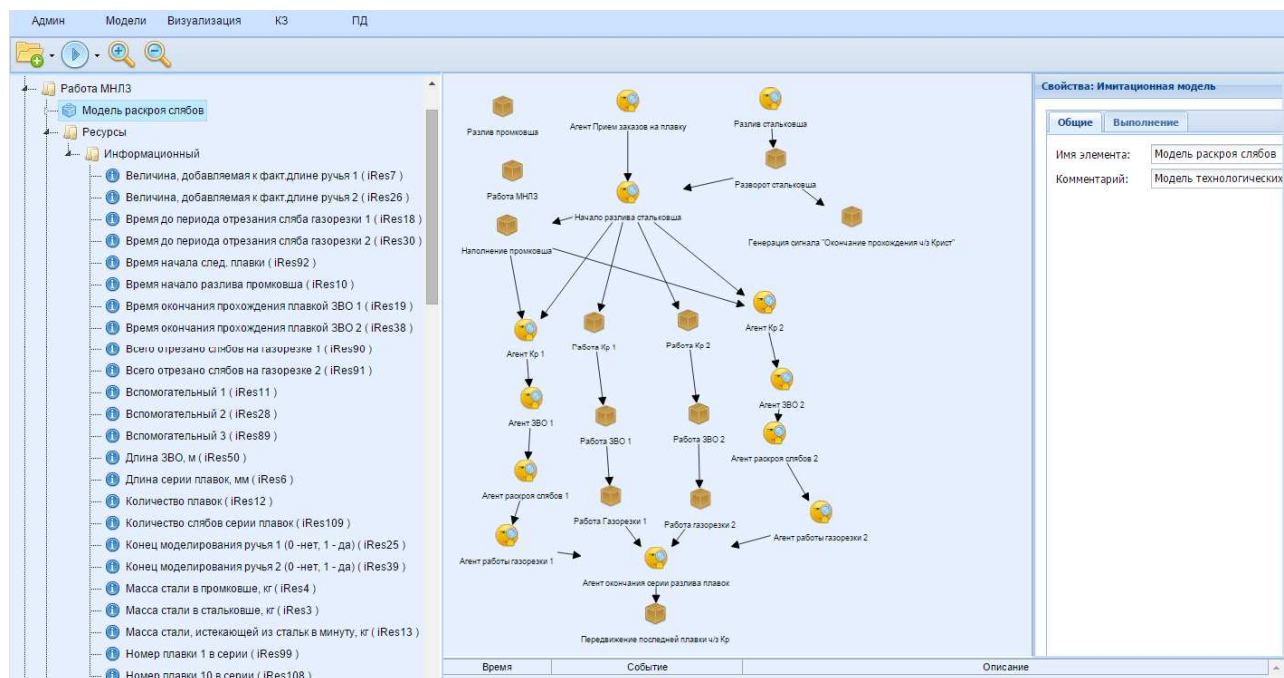


Рис. 2. Структура модели раскроя слябов в модуле СМП АИС МОД

В модели раскроя слябов описано семь заявок. Заявка $z1$ «Заказ на плавку» является основной заявок, которая накапливает в своих атрибутах данные всех заявок по временным характеристикам работы элементов МНЛЗ и количеству слябов каждой плавки. Заявки $z2$ и $z3$ «Плавка через кристаллизатор 1/2» применяются для описания логики работы кристаллизаторов обоих ручьев МНЛЗ; заявки $z4$ и $z5$ «Плавка через ЗВО 1/2» применяются для описания логики работы ЗВО обоих ручьев МНЛЗ; заявки $z6$ и $z7$ «Плавка через газорезку 1/2» применяются для описания логики работы газорезок обоих ручьев МНЛЗ.

Работу модели раскроя слябов условно можно разделить на работу трех блоков:

- 1) блок описания состояний стальнойша/промковша, включающий описание операций разлива стали из стальнойша, наполнения промковша сталью из стальнойша, разлива стали из промковша, разворота поворотного стенда со стальнойшом;
- 2) блок описания работы элементов МНЛЗ – кристаллизатора, ЗВО и газорезки – по каждому из двух ручьев МНЛЗ;
- 3) блок описания генерации и удаления заявок.

Алгоритм раскроя слябов на границе плавков описывается с помощью агентов раскроя слябов по каждому ручью МНЛЗ. На рисунке 3 приведена база знаний агента раскроя слябов 1 (для ручья 1), которая содержит ситуации раскроя из таблицы 1. Отдельная ситуация,

диагностируемая агентом, представляется производственным правилом вида «Если – Тогда», построенным с использованием переменных (ресурсов и заявок) модели.

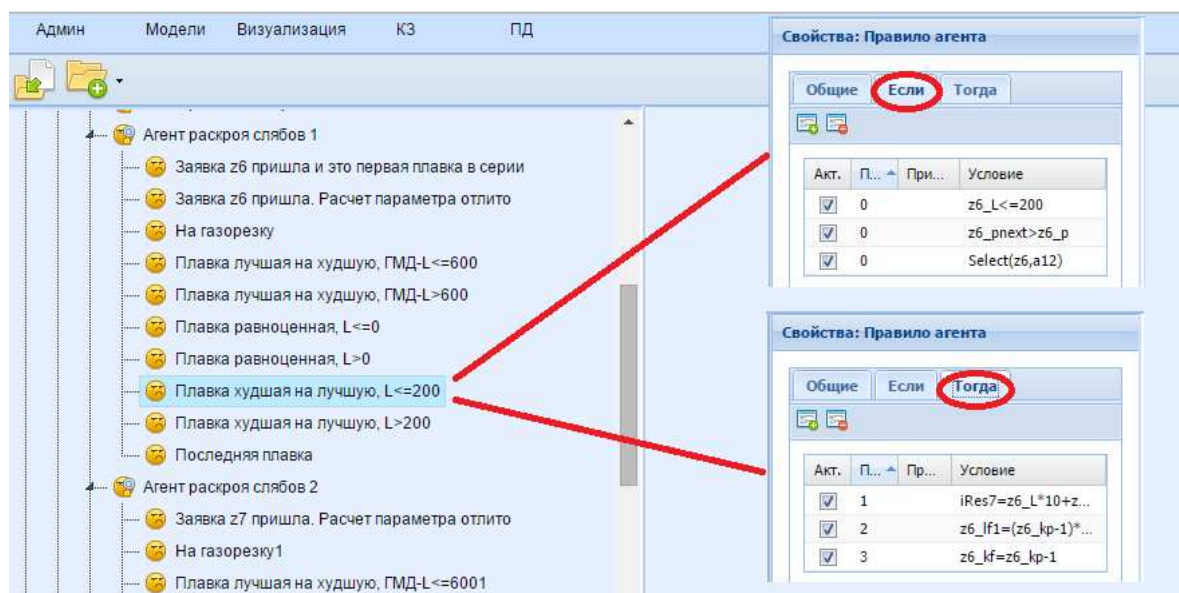


Рис. 3. Структура модели раскроя слябов в модуле СМП АИС МОД

Анализ результатов моделирования

Рассмотрим проведение экспериментов с моделью в модуле оптимизации процессов (ОПП) АИС МОД. По результатам выполнения модели с начальными исходными данными (базовый эксперимент) была сформирована таблица 2. Были получены следующие значения выходных характеристик: фактическая длина серии плавков $L_{\phi}= 887242$ мм, фактическое количество слябов серии плавков $K_{\phi}=110$ слябов, сумма отклонений количества слябов по ручью $S=4$.

Таблица 2

Результаты проведения базового эксперимента в модуле ОПП АИС МОД

Входные параметры			Выходные параметры			
Номер плавки, i	Марка стали G^i	ХМД i , мм	Длина плавки по ручью, мм L_{ϕ}^i	Фактическое количество слябов плавки по ручью, K_{ϕ}^i	Расчетное количество слябов плавки по ручью, K_p^i	Отклонение в количестве слябов плавки по ручью, Δ^i
1	В	5500	39039	7	7	0
2	В	7900	48066	6	5	1
3	А	12000	36504	3	3	0
4	А	9100	46135	5	6	-1
5	В	6000	48672	9	9	0
6	В	8800	53538	6	5	1
7	А	6700	40764	5	5	0
8	А	7300	44412	6	6	0
9	В	10100	51205	5	5	0
10	В	11600	35286	3	3	0
Сумма отклонений количества слябов по ручью, S						4

Была проведена серия из 7 экспериментов, в которой анализировалась подача плавок с разным чередованием ГМД и марки стали. Результаты проведения серии экспериментов представлены на рисунке 4 в виде гистограммы распределения суммы отклонений количества слябов по ручью S в зависимости от эксперимента.

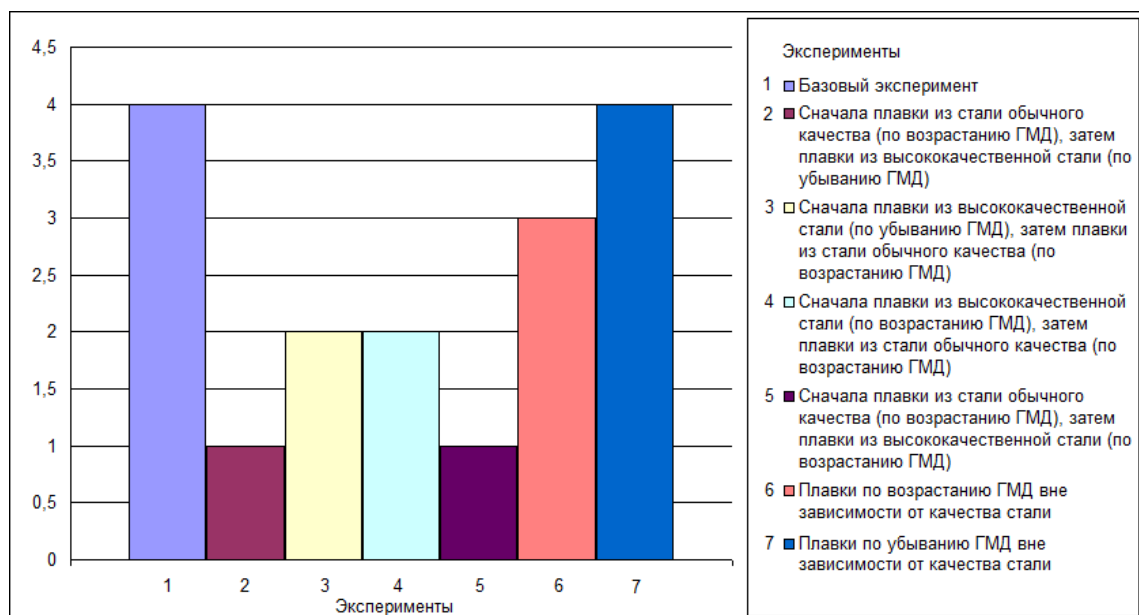


Рис. 4. Зависимость суммы отклонений количества слябов по ручью S от эксперимента

Согласно рисунку 4 экспериментами с лучшими результатами являются эксперименты № 2 и № 5: они характеризуются отсутствием отрицательных отклонений в количестве слябов по ручью и единственным положительным отклонением. В данных экспериментах на вход МНЛЗ подавалась следующая последовательность плавок: сначала плавки из стали обычного качества, затем плавки из высококачественной стали. Влияние возрастания/убывания ГМД плавок на число отклонений количества слябов выявлено не было.

Заключение

В ходе исследования процесса раскря слябов на границе плавок МНЛЗ была разработана имитационная модель раскря слябов с помощью модуля СМП АИС МОД.

Разработанная модель раскря слябов была применена для решения задачи оптимизации последовательности подаваемых на МНЛЗ плавок с целью достижения минимальных отклонений фактического количества полученных слябов по ручью от расчетного количества. В результате проведения серии экспериментов с моделью в модуле ОПП АИС МОД были предложены следующие рекомендации по оптимизации технологических процессов работы МНЛЗ: необходимо осуществлять подачу плавок разных сортов стали на МНЛЗ в следующей последовательности – сначала плавки из стали обычного качества, затем плавки из высококачественной стали. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, полученными на производстве.

На основании проведенного исследования можно сделать вывод о том, что дальнейшая разработка имитационных моделей для металлургического производства с помощью АИС МОД АС ВМП представляется перспективной с точки зрения оптимизации технологических, логистических и организационных бизнес-процессов предприятия.

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. – М., 2014. – № 7. – С. 49–53.
2. Аксенов К.А. Модель мультиагентного процесса преобразования ресурсов и системный анализ организационно-технических систем // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2009. — № 6. — С. 38–45.
3. Белый В.А. и др. Роль компьютерного моделирования в оптимизации технологических процессов непрерывной разливки стали. Сообщение 3 // Металл и литье Украины. – 2012. – № 1. – С. 3–11.
4. Бородин А.М., Мирвода С.Г., Поршнева С.В. Анализ современных средств прототипирования языков программирования // Программная инженерия. – 2014. – № 12. – С. 3–10.
5. Бородин А.М., Мирвода С.Г., Поршнева С.В. Особенности тестирования устойчивости к сбоям корпоративных информационных систем методом генерирования отказов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – URL: www.science-education.ru/119-14997 (дата обращения: 20.02.2015).
6. Жеребцов А., Белошапка А. Имитационное моделирование как инструмент оптимизации производственных процессов в металлургии // Информационные системы. – 2009. – №6. – С. 29-31.
7. Повитухин С.А. Математическое моделирование процесса охлаждения слитка в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок // Вестник ТГТУ. – 2009. – Т. 15. – № 3. – С. 672–680.
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. Aksyonov K. A., Spitsina I. A., Sysoletin E. G., Aksyonova O. P., Smoliy E. F. Multi-agent approach for the metallurgical enterprise information system development // 24th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2014), 7—13 September 2014, Sevastopol, vol. 1, pp.437–438.

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.