

УДК 004.94:519.622

## СТРУКТУРНО-ТЕКСТОВАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВКИ КИМБЕРЛИТОВОЙ РУДЫ\*

Ю.В. ШОРНИКОВ<sup>1</sup>, Е.А. ПОПОВ<sup>2</sup>, А.С. ДАНИЛОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления. E-mail: shornikov@inbox.ru

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры автоматизированных систем управления. E-mail: filfgo@gmail.com

<sup>3</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры автоматизированных систем управления. E-mail: danilov.as@inbox.ru

Изучен технологический процесс транспортировки кимберлитовой руды на горно-обогатительном комбинате в поселке Мирный, принадлежащем группе алмазодобывающих компаний АК «АЛРОСА» (ПАО). Добытая на руднике трубки «Интернациональная» руда погружается в автосамосвалы и перевозится на промежуточный склад, затем руда по мере необходимости транспортируется на постоянный склад и далее поставляется на обогатительную фабрику. Обозначенный процесс включает как непрерывные, так и дискретные компоненты, что обуславливает использование современной методологии гибридных систем. Авторами построена структурно-текстовая модель процесса движения руды и транспортных средств между трубкой «Интер» и обогатительной фабрикой № 3 в среде моделирования сложных динамических систем ИСМА, разрабатываемой на кафедре автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Структурно-текстовые модели состоят из компонентов двух типов – графических, реализуемых в виде структурных схем теории автоматического управления, и текстовых, задаваемых на языке LISMA\_PDE. Проведены эксперименты с построенной моделью с целью определения эффективности и надежности применяемой стратегии перевозки руды. В некоторый момент на руднике происходит авария (затопление, взрыв и т. п.), приводящая к остановке добычи руды на 30 дней. На основании прогона модели установлена корректность используемого плана транспортировки руды даже при условии подобных непредвиденных ситуаций. Используются оригинальные явные численные методы с расширенными областями устойчивости с контролем точности и устойчивости, а также оригинальный алгоритм обнаружения событий для численного моделирования гибридных систем.

---

\* Статья получена 16 июня 2017 г.  
Работа поддержана грантом РФФИ 17-07-01513.

**Ключевые слова:** дифференциально-алгебраические уравнения, гибридные системы, кимберлитовая руда, структурно-текстовая модель, задача Коши, Мирнинский ГОК, ИСМА

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-2-70-81

## ВВЕДЕНИЕ

Первые алмазы были найдены в Якутии в 1949 году, и в скором времени была организована их добыча. В 1957 году в Мирном был создан трест «Якут-алмаз», в дальнейшем реорганизованный в объединение и затем в производственно-научное объединение. В 1992 на базе предприятия была создана акционерная компания «АЛРОСА». В структуру компании включены Мирнинский, Айхальский, Нюрбинский и Удачныйский горно-обогатительные комбинаты (ГОК). В работе рассматривается только Мирнинский ГОК, в комплекс которого входят две трубки – «Интернациональная» и «Мир», три россыпных месторождения, обогатительная фабрика № 3 и ряд вспомогательных предприятий [1]. Потоки сырья от кимберлитовой трубки «Мир» исключены из рассмотрения. На рис. 1 представлена содержательная схема технологического процесса транспортировки руды от месторождения «Интер» до обогатительной фабрики № 3.

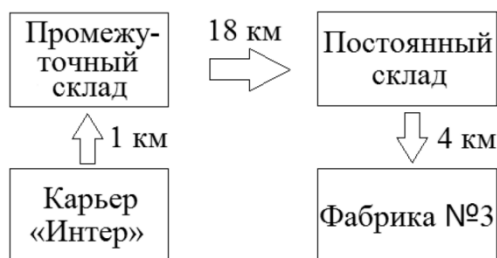


Рис. 1. Схема техпроцесса транспортировки руды

Перевозка руды осуществляется с помощью автосамосвалов БелАЗ-7547 грузоподъемностью 45 тонн [2]. Добытая руда из карьера «Интер» перевозится на промежуточный склад. Вместимость промежуточного склада 45 000 тонн. Далее руда транспортируется на склад постоянного хранения, вместимость которого составляет 200 000 тонн. Руда подвозится с постоянного склада в зависимости от нужд фабрики № 3. Всего на перевозку руды из карьера «Интер» задействовано пять автосамосвалов. Погрузка автосамосвалов в каждом пункте осуществляется последовательно с помощью одного погрузчика.

Добыча и транспортировка руды происходит ежедневно круглосуточно в три смены. Поставка руды на обоганительную фабрику № 3 осуществляется непрерывно с постоянным темпом. Плановый уровень добычи руды в год – 500 000 тонн.

## 1. ИСМА

В качестве пакета для моделирования использована инструментальная среда ИСМА (инструментальные средства машинного анализа), разрабатываемая на кафедре автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета [3, 4]. Система имеет несколько входных языков. Универсальными языками спецификации являются текстовый язык LISMA и язык структурных схем [5]. Также система включает возможности моделирования электроэнергетических систем и решения задач химической кинетики с помощью предметно-ориентированных языков.

Для решения жестких систем дифференциальных уравнений [6] в решателе ИСМА [7] в основном используются оригинальные явные методы с расширенными областями устойчивости с контролем точности и устойчивости [8], в отличие от мировой практики, где принято интегрировать жесткие системы неявными методами. Использование абсолютно устойчивых схем связано с некоторыми сложностями: в частности, приводит к повышенным требованиям к объему оперативной памяти для хранения матрицы Якоби и к вычислительным ресурсам, необходимым для декомпозиции этой матрицы. В работе [9] показана ограниченная применимость неявных методов при моделировании гибридных систем [10].

Для моделирования дискретных событий в среде ИСМА применяется оригинальный алгоритм корректного обнаружения событий [11], основанный на работах американского ученого J. Esposito [12].

## 2. СТРУКТУРНО-ТЕКСТОВАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА

В работе [13] показан способ спецификации моделей системной динамики J. Forrester [14] в виде структурно-текстовых моделей без использования предложенного им языка DYNAMO [15]. Этот подход применяется в дальнейшем при построении модели транспортировки руды.

Темп погрузки руды в автосамосвалы моделируется с помощью прямоугольной импульсной функции, изображенной на рис. 2. Длительность импульса  $\Delta T = N t_{\Pi}$ , где  $N$  – количество автосамосвалов,  $t_{\Pi}$  – время погрузки одного самосвала. Величина импульса  $f_{\max}$  определяется как решение урав-

нения  $\int_t^{t+\Delta T} f_{\max}(t)dt = VN$ , где  $t$  – время начала импульса,  $V$  – вместимость

автосамосвала. Время начала импульса определяется из принятого в эксперименте расписания движения транспортных средств. В среде ИСМА подобные функции могут быть реализованы через блок «нелинейная функция» путем ввода пар аргумент–значение. Предусмотрена возможность импорта из файлов табличного процессора Microsoft Excel, где значения уже могут быть сгенерированы алгоритмически.

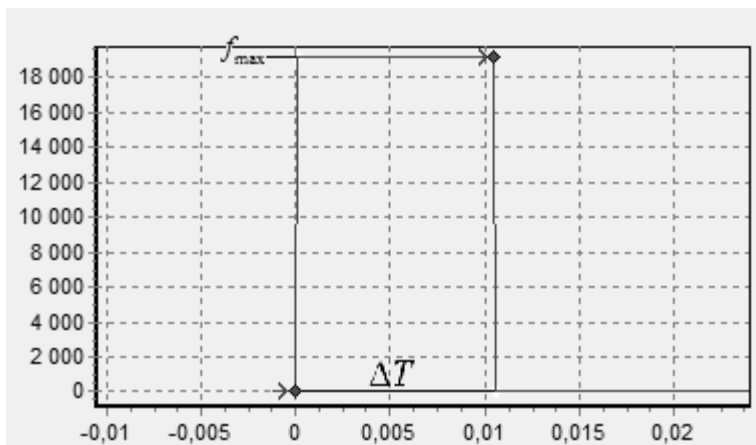


Рис. 2. Темп погрузки руды

Добыча руды в карьере косвенно моделируется через функцию решения, формирующую темп погрузки руды в карьере.

Темп погрузки руды на постоянном складе моделируется также прямоугольной импульсной функцией, моменты начала импульсов определяются текущими значениями уровней руды на промежуточном и постоянном складах: рейс осуществляется, если промежуточный склад заполнен более чем на 75 % или если постоянный склад заполнен менее чем на 75 %. Рейсы осуществляются только в период с 16:00 до 24:00. Время между рейсами ограничено снизу некоторой величиной, равной, например, одному часу.

Структурно-текстовая модель [11] технологического процесса представлена на рис. 3. Модель содержит три уровня [13]: руда на промежуточном складе, руда на постоянном складе и доставленная на фабрику руда. Блоки «Карьер – Промежуточный склад», «Промежуточный склад. Разгрузка», «Промежуточный склад – Постоянный склад», «Склад. Разгрузка», «Склад –

Фабрика», «Фабрика. Разгрузка» представляют собой запаздывание третьего порядка, графическая модель которого изображена на рис. 4.

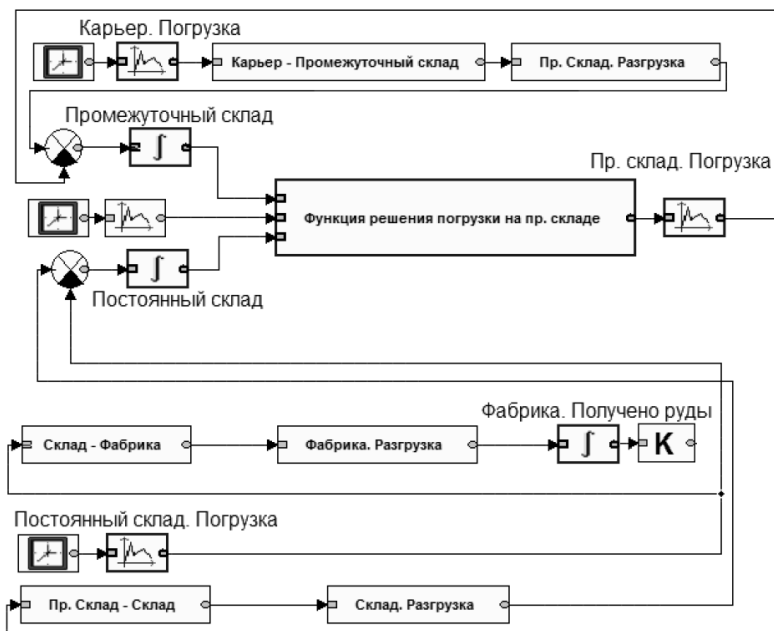


Рис. 3. Структурно-текстовая модель техпроцесса

Среда ИСМА поддерживает макросредства для повышения наглядности моделей и утилизации разработанных компонентов. Запаздывание третьего порядка представляется в виде трех запаздываний первого порядка, что отражено на рис. 4.

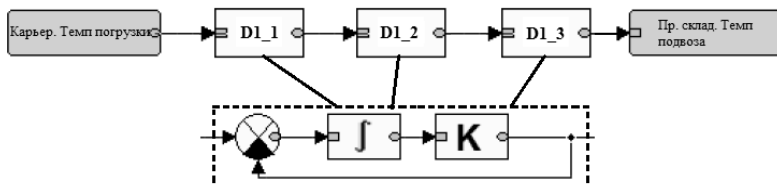


Рис. 4. Графическая модель запаздывания третьего порядка

Текстовая часть модели, содержимое блока «Функция решения погрузки на промежуточном складе», определяющего темп погрузки руды на промежуточном складе в соответствии с вышеописанным алгоритмом, представлено на рис. 5.

```
1 timeSinceLoadingStarted = 1.0; // время с начала последней погрузки
2 time = 1.0; // текущее модельное время
3
4 const warehouseCapacityMax = 200000.0; // максимальная вместимость постоянного склада
5 const temporaryWarehouseCapacityMax = 45000.0; // максимальная вместимость временного склада
6 const timeBetweenRuns = 1.0 / 24.0; // минимальный период времени между двумя рейсами
7 const warehouseTrigger = 0.75;
8 const temporaryWarehouseTrigger = 0.75;
9 const runsScheduleStart = 0.666666; // минимальное время суток начала рейсов
10
11 // dayNumber - номер дня
12 currentDayTime = time - dayNumber; // текущее время суток [0.0; 1.0)
13
14 // warehouseCapacity - текущий уровень руды на складе
15 // temporaryWarehouseCapacity - текущий уровень руды на промежуточном складе
16 if ( ( warehouseCapacity <= warehouseTrigger * warehouseCapacityMax ) OR
17     ( temporaryWarehouseCapacity <= temporaryWarehouseTrigger * temporaryWarehouseCapacityMax ) ) AND
18     ( timeSinceLoadingStarted >= timeBetweenRuns )
19     AND ( currentDayTime >= runsScheduleStart )
20 {
21     set timeSinceLastLoading = 0.0;
22 }
```

Рис. 5. Содержимое блока «Функция решения погрузки на промежуточном складе»

Определено два состояния гибридной системы [10, 11]: «обычное», при переходе в которое ничего не происходит, и «начало погрузки», в котором скачкообразно изменяется значение фазовой переменной, отражающей время с начала последней погрузки. На следующем шаге интегрирования сразу же происходит переход в состояние «обычное» из состояния «начало погрузки». На вход блока поступают следующие значения: номер дня, целая часть модельного времени; уровень руды на промежуточном складе; уровень руды на постоянном складе. На выход поступает значение времени с начала последней погрузки. К выходу блока подключена нелинейная функция, моделирующая один цикл погрузки автосамосвалов, начиная с нулевого момента времени.

### 3. СЦЕНАРИИ СОБЫТИЙ. ВНЕЗАПНАЯ ОСТАНОВКА ДОБЫЧИ РУДЫ

Будем использовать следующую схему транспортировки. Погрузка руды у карьера осуществляется ежедневно с 00:00 до 08:00, выполняются семь рейсов по пять самосвалов каждый час. Самосвалы загружаются на 90 %, т. е. по 40,5 тонны руды. Погрузка руды с постоянного склада осуществляется ежедневно с 16:00 до 24:00, выполняются также семь рейсов по пять самосвалов. Проведя моделирование, получаем, что за год будет доставлено 517 300 тонн

руды на фабрику, что соответствует плану перевозок (500 000 тонн). Перевыполнение плана на реальном объекте будет компенсировано исключенным из рассмотрения в модели фактором периодического выхода их строя автосамосвалов. На промежуточном складе уровень запасов колеблется от 33 600 до 35 000 тонн.

Проведем следующий эксперимент. Неожиданно добыча руды останавливается на 30 дней (с 100-го по 130-й день), что может быть связано, например, с обрушением шахты. Время погрузки автосамосвала составляет три минуты; время разгрузки автосамосвала – две минуты; минимальный период осуществления рейсов между складом и фабрикой № 3 – один час; шаг интегрирования –  $10^{-4}$  часов; период моделирования – один год. На промежуточном складе в начальный момент времени находится 33 600 тонн руды, на постоянном – 161 400 тонн.

На рис. 6 представлены графики изменения уровней руды на складах и суммарного количества руды, доставленной на фабрику. До 100-го дня система

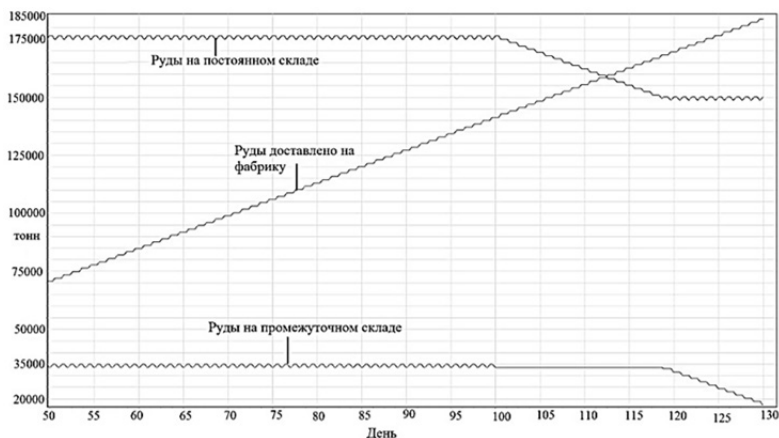


Рис. 6. Уровни руды на складах и количество доставленной на фабрику руды с 50-го по 130-й день

находилась в квазиустойчивом состоянии. Начиная с 100-го дня прекратилась поставка руды на промежуточный склад. Уровень руды на промежуточном складе составил чуть менее 75 % от номинального объема, а на постоянном складе превысил 75 % номинального объема. Это привело к остановке транспортировки руды между промежуточным и постоянным складами. Уровень руды на промежуточном складе остался неизменным, а на постоянном – уменьшился до 118-го дня. На 118-й день уровень руды на

постоянном складе стал ниже комфортного на 75 % от номинального, перевозка руды с промежуточного склада на постоянный возобновилась, уровни руды на складах стабилизировались. Начиная со 130-го дня добыча руды возобновилась, система вновь пришла в квазиустойчивое равновесие. За весь период простоя карьера доставка руды на фабрику не прекращалась и не уменьшалась за счет исходных запасов руды на складах. Можно сделать заключение, что предложенные график перевозок и начальные уровни запасов руды на складах являются достаточными для обеспечения ГОК даже в случае неожиданной остановки добычи руды на месяц.

## ВЫВОДЫ

На основе парадигм системной динамики построена структурно-текстовая модель технологического процесса перевозки кимберлитовой руды от трубки «Интер» до обогатительной фабрики № 3. Представлен план транспортировки руды. Экспериментально показано, что предложенный план может обеспечить плановую загрузженность обогатительной фабрики. Предложены необходимые уровни запасов на складах, при которых обогатительная фабрика продолжает работать даже в случае, если добыча руды останавливается на месяц.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт АК «АЛРОСА» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.alrosa.ru/> (дата обращения: 13.09.2017).
2. Карьерные самосвалы – серия 7547 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.belaz.by/catalog/products/dumptrucks/7547/> (дата обращения: 13.09.2017).
3. Шорников Ю.В., Бессонов А.В. Компоненты ядра программного комплекса «ИСМА 2015»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617235. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2015.
4. Shornikov Yu.V., Myssak M.S., Dostovalov D.N. Computer simulation of hybrid systems by ISMA instrumental facilities // Recent Advanced in Mathematical Methods in Applied Sciences: proceedings of the 2014 international conference on mathematical models and methods in applied sciences (MMMAS'14): proceedings of the 2014 international conference on economics and applied statistics (EAS'14), St. Petersburg, 23–25 September 2014. – St. Petersburg, 2014. – P. 257–262. – (Mathematics and computers in science and engineering; vol. 32). – ISBN 978-1-61804-251-4.



5. *Востриков А.С., Французова Г.А., Гаврилов Е.Б.* Основы теории непрерывных и дискретных систем регулирования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 476 с.
6. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 592 с.
7. *Шорников Ю.В., Новиков Е.А., Насырова М.С.* Вычислительное ядро программного комплекса ИСМА 2015: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617617. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2015.
8. *Новиков Е.А.* Явные методы для жестких систем. – Новосибирск: Наука, 1997. – 197 с.
9. *Шорников Ю.В., Достовалов Д.Н.* Моделирование жестких гибридных систем с односторонними событиями в среде ИСМА // Компьютерное моделирование 2012: труды международного семинара. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 36–41.
10. *Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б.* Моделирование систем. Динамические и гибридные системы. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 224 с.
11. *Новиков Е.А., Шорников Ю.В.* Компьютерное моделирование жестких гибридных систем: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 451 с.
12. *Esposito J., Kumar V., Pappas G.* Accurate event detection for simulation of hybrid systems // Hybrid Systems: Computation and Control. – Berlin: Springer, 2001. – P. 204–217. – (LNCS; vol. 2034).
13. *Форрестер Дж.* Основы кибернетики предприятия: (индустриальная динамика). – М.: Прогресс, 1971. – 342 с.
14. ДИНАМО – язык математического моделирования: (формальное описание) / Р.П. Беркович, П.Л. Корявов, Ю.Н. Павловский, Б.Г. Сушков. – М.: ВЦ АН СССР, 1972. – 30 с.
15. Модели системной динамики в окружении ИСМА\_2015 / Ю.В. Шорников, В.Л. Кириллов, А.В. Бессонов, Е.А. Попов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 4 (82). – С. 122–135.

**Шорников Юрий Владимирович**, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: теория гибридных систем, теория языков программирования, инструментальное моделирование гибридных систем. Имеет более 150 публикаций. E-mail: shornikov@inbox.ru

**Попов Евгений Александрович**, аспирант кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического универ-

ситета. Основные направления научных исследований: гибридные системы, системная динамика, моделирование переходных процессов в электроэнергетических системах. Имеет 9 публикаций. E-mail: filfgo@gmail.com

**Данилов Алексей Сергеевич**, аспирант кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: системная динамика, моделирование сложных систем, гибридные системы. Имеет 7 публикаций. E-mail: danilov.as@inbox.ru

### **Block-textual modeling transportation of kimberlite \***

**Yu.V. Shornikov<sup>1</sup>, Y.A. Popov<sup>2</sup>, A.S. Danilov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> 630073, Russian Federation, Novosibirsk, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk state technical university, doctor of Technical Sciences, professor of the automated control system department. E-mail: shornikov@inbox.ru

<sup>21</sup> 630073, Russian Federation, Novosibirsk, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk state technical university, doctoral student of the automated control system department. E-mail: filfgo@gmail.com

<sup>31</sup> 630073, Russian Federation, Novosibirsk, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk state technical university, doctoral student of the automated control system department. E-mail: danilov.as@inbox.ru

The workflow of kimberlite transportation in Mirny ore mining and processing enterprise, owned by a group of diamond mining companies, Alrosa PJSC, is studied. The ore extracted at the Internationalnaya mine is loaded into dump trucks and is transported to a temporary warehouse. Then the ore is transported from the temporary warehouse to a main warehouse when needed. The stuff is moved from the main warehouse to the concentrating plant #3. The transportation process contains both continuous and discrete elements, therefore the theory of hybrid systems, a modern approach, is used to analyze it. The block-textual model of the movement of kimberlite between the Inter kimberlite mine and the concentrating plant #3 is built using ISMA, an environment for modeling and simulation of complex dynamical systems, which is developed by Automated control systems department of Novosibirsk state technical university. Block-textual models consist of the components of two types: graphical elements implemented as the block diagrams of control theory and textual elements specified in the LISMA\_PDE language. Simulations are carried out in order to assess the effectiveness and reliability of the kimberlite transportation strategy. At some point there happens an emergency at the mine (a flood, an explosion, etc.) causing the mining process to stop for 30 days. Given the simulation results, it can be concluded that the used transportation strategy is correct even if such unforeseen situations occur. Original explicit numerical methods with extended regions of stability and accuracy and stability control and the original correct event detection algorithm for simulation of hybrid systems are used.

---

\* Received 16 June 2017.

**Keywords:** differential-algebraic equations, hybrid systems, kimberlite, block-textual model, Cauchy problem, Mirny ore mining and processing enterprise, ISMA

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-2-70-81

## REFERENCES

1. The official site of Alrosa PJSC. (In Russian). Available at: <http://www.alrosa.ru/> (accessed 13.09.2017).
2. *Kar'ernye samosvaly – seriya 7547* [Haul trucks – 7547 series]. Available at: <http://www.belaz.by/catalog/products/dumptrucks/7547/> (accessed 13.09.2017).
3. Shornikov Yu.V. *Komponenty yadra programmnogo kompleksa "ISMA"* [The components of core of "ISMA 2015" software]. The Certificate on official registration of the computer program. N 2015617235, 2015.
4. Shornikov Yu.V., Myssak M.S., Dostovalov D.N. Computer simulation of hybrid systems by ISMA instrumental facilities. *Recent advanced in mathematical methods in applied sciences: proceedings of the 2014 international conference on mathematical models and methods in applied sciences (MMMAS'14): proceedings of the 2014 international conference on economics and applied statistics (EAS'14)*, St. Petersburg, 23–25 September 2014, pp. 257–262. ISBN 978-1-61804-251-4.
5. Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A., Gavrilov E.B. *Osnovy teorii nepreryvnykh i diskretnykh sistem regulirovaniya* [Theory foundations of continuous and discontinuous control systems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2008. 476 p.
6. Kalitkin N.N. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2011. 592 p.
7. Shornikov Yu.V., Novikov E.A., Nasyrova M.S. *Vychislitel'noe yadro programmnogo kompleksa ISMA 2015* [Computing core of software package "ISMA 2015"]. The Certificate on official registration of the computer program. N 2015617617, 2015.
8. Novikov E.A. *Yavnye metody dlya zhestkikh sistem* [Explicit methods for stiff systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1997. 197 p.
9. Shornikov Yu.V., Dostovalov D.N. [Modeling and simulation of stiff hybrid systems with one-sided events in ISMA environment]. *Komp'yuternoe modelirovanie 2012: trudy mezhdunarodnogo seminara* [Computer modeling 2012: Proceedings of the international workshop]. St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2012, pp. 36–41.
10. Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. *Modelirovanie sistem. Dinamicheskie i gibridnye sistemy* [Modelling of systems. Dynamical and hybrid systems]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2012. 224 p.
11. Novikov E.A., Shornikov Yu.V. *Komp'yuternoe modelirovanie zhestkikh gibridnykh sistem* [Computer simulation of stiff hybrid systems: monograph]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2012. 451 p.

12. Esposito J., Kumar V., Pappas G. Accurate event detection for simulation of hybrid systems. *Hybrid Systems: Computation and control. LNCS 2034*. Berlin, Springer, 2001, pp. 204–217.
13. Forrester J. *Industrial dynamics*. Cambridge, Massachusetts Institute of Technology Press, 1961. 464 p. (Russ, ed.: Forrester Dzh. *Osnovy kibernetiki predpriyatiya: (industrial'naya dinamika)*. Moscow, Progress Publ., 1971. 342 p.).
14. Berkovich R.P., Koryavov P.L., Pavlovskii Yu.N., Sushkov B.G. *DINAMO – yazyk matematicheskogo modelirovaniya: (formal'noe opisanie)* [DYNAMO mathematical modelling language (formal description)]. Moscow, Computing centre of the academy of sciences of the USSR Publ., 1972. 30 p.
15. Shornikov Yu.V., Kirillov V.L., Bessonov A.V., Popov E.A. Modeli sistemnoi dinamiki v okruzhenii ISMA\_2015 [System dynamics models in ISMA\_2015 environment]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 4 (82), pp. 122–135.