

## Моделирование функционирования шахты средствами алгебры конечных автоматов ДТА

Д. А. Гапанович<sup>1\*</sup>, В. А. Сухомлин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», г. Москва, Российская Федерация

Адрес: 119991, Российская Федерация, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1

\* dim.gapanovich@gmail.com

<sup>2</sup> ФГУ «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация

Адрес: 119333, Российская Федерация, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44-2

### Аннотация

Данная статья является продолжением предыдущей работы авторов, посвященной разработке алгебры конечных автоматов специального вида ДТА (Digital Twin Algebra), предназначенной для математического моделирования поведения цифровых двойников производства. В данной работе для математического моделирования функционирования двойников используется аппарат алгебры ДТА в виде систем конечных автоматов, согласованных по событиям или event matched machines - сокращенно – ЕММ-систем, при этом автоматы (квазиавтоматы) таких систем рассматриваются как имеющие специализированную многосортную структуру и соответствующую интерпретацию поведения. Многосортность структуры автоматов реализуется разбиением состояний квазиавтоматов ЕММ-систем на непересекающиеся классы, а именно множества их состояний разбиваются на два класса – А (состояния режимов функционирования объекта, моделируемого с помощью КА) и В (состояния производственной деятельности объекта). Такие КА называются двудольными КА или сокращенно ВРА (Bipartite automaton). Используя наглядное графическое представление таких двудольных автоматов в виде диаграмм Мура, рассмотрен пример описания функционирования оборудования и средств некоторой воображаемой шахты горнодобывающего предприятия, демонстрирующий наглядность и адекватность средств предложенного аппарата для моделирования поведения аналогичных объектов производства.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, ЦД, кибер-физическая система, ЦПС, алгебра конечных автоматов, конечный автомат Мили, диаграммы конечных автоматов Мили, математическое моделирование двойников производства

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Гапанович Д. А., Сухомлин В. А. Моделирование функционирования шахты средствами алгебры конечных автоматов ДТА // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2022. Т. 18, № 3. С. 634-643. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202203.634-643>

© Гапанович Д. А., Сухомлин В. А., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



## Modeling the Functioning of the Mine Using the Algebra of Finite Automata DTA

D. A. Gapanovich<sup>a,b\*</sup>, V. A. Sukhomlin<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation  
Address: 1 Leninskie gory, Moscow 119991, GSP-1, Russian Federation  
\* dim.gapanovich@gmail.com

<sup>b</sup> Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation  
Address: 44 Vavilov St., building 2, Moscow 119333, Russian Federation

### Abstract

This article is a continuation of the authors' previous work devoted to the development of the algebra of finite automata of the special type DTA (Digital Twin Algebra), designed for mathematical modeling of the behavior of digital twins of production. In this work, the mathematical modeling of the functions of twins uses the DTA algebra apparatus in the form of systems of event-matched finite automata or event matched machines – abbreviated – EMM-systems, while automata (quasi-automata) of such systems are considered as having a specialized multi-sorted structure and an appropriate interpretation of behavior. The multi-sorted structure of automata is realized by dividing the states of quasi-automatic machines of EMM systems into non-intersecting classes, namely, the sets of their states are divided into two classes – A (states of the modes of operation of an object modeled using FSA) and B (states of the production activity of an object). Such FSAs are called bipartite FSAs or abbreviated as BPA (Bipartite Automaton). Using a graphical view of such bipartite automata in the form of Moore diagrams, an example of describing the functioning of equipment and facilities of some imaginary mine of a mining enterprise is considered. This example demonstrates the clarity and adequacy of the means of the proposed apparatus for modelling the behavior of similar production facilities.

**Keywords:** digital twin, DT cyber-physical system, DSP, finite automata algebra, Mealy finite automaton, Mealy finite automaton diagrams, mathematical modeling of production twins

**Conflict of interests:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Gapanovich D.A., Sukhomlin V.A. Modeling the Functioning of the Mine Using the Algebra of Finite Automata DTA. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2022;18(3):634-643. doi:<https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202203.634-643>



## 1. Алгебра ДТА и метод двудольных квазиавтоматов

В работе [1] приведено описание алгебры конечных автоматов специального вида, разработанной для математического моделирования цифровых двойников производства<sup>1</sup> [2] и получившей название Digital Twin Algebra (DTA). В алгебру DTA включены как общеизвестные операции, например операция прямого произведения автоматов и операция суперпозиции автоматов, так и вновь введенные операции, включая: операции группирования конечных автоматов в параллельный блок, группирования иерархической структуры, системной композиции, ассоциации между автоматами, рекурсивного вызова автомата, асинхронного вызова автомата. Предложенный математический аппарат создавался для разработки формальных моделей физических активов производства, их цифровых двойников, а также комплексных моделей киберфизических систем, включающих как физические, так и виртуальные активы [3-10].

Множеством-носителем элементов алгебры DTA является множество конечных автоматов Мили<sup>2</sup> [11]. Напомним определение такого автомата.

Под конечным автоматом  $M$  (Мили) понимается следующая конфигурация:

$$M = \langle A, B, Q, \delta, \lambda \rangle.$$

- $A$  – входной алфавит – непустое конечное множество входных символов (входных событий автомата, например сигналов от сенсоров),
- $B$  – выходной алфавит – непустое конечное множество выходных символов (например, производимых автоматом событий или сигналов),
- $Q$  – множество состояний автомата – непустое конечное множество символов состояний автомата (его память),
- $\delta$  – функции переходов автомата – однозначное отображение вида:  $Q \times A \rightarrow Q$
- $\lambda$  – функцией выходов автомата – отображение вида:  $Q \times A \rightarrow B$

Часто в автоматную конфигурацию добавляется начальное состояние автомата –  $q_0$ . Тогда автомат называется инициальным, а его конфигурация имеет следующий вид:

$$M = \langle A, B, Q, \delta, \lambda, q_0 \rangle$$

Используемый в данной работе вариант алгебры DTA определяется следующим образом:

$$DTA = \langle W, \times, M\{\}, *, \Omega, \boxtimes, \langle R \rangle, call, fork \rangle, \text{ где}$$

- $W$  – множество конечных автоматов, а список операций алгебры DTA включает следующий набор операций над автоматами [1]:
- « $\times$ » – операция прямого произведения автоматов
- « $M\{\}$ » – операция группирования конечных автоматов в параллельный блок
- « $*$ » – операция суперпозиции автоматов
- « $\Omega$ » – операция группирования иерархической структуры

- « $\boxtimes$ » – операция системной композиции
- « $\langle R \rangle$ » – операция ассоциации между автоматами
- « $call$ » – операция рекурсивного вызова автомата
- « $fork$ » – операция асинхронного вызова автомата.

Для моделирования систем, представляющих собой композиции автоматов, совместно функционирующих над общим пространством событий с согласованными переходами автоматов в локальные состояния в [1] была введена многоместная операция системной композиции с переменным конечным числом операндов-автоматов, предназначенная для интеграции двух и большего числа конечных автоматов в систему-автомат. Построенные с помощью этой операции системы конечных автоматов, согласованные по событиям (Event Matched Machines – EMM) будем называть EMM-системами [12-19].

Синтаксис операции системной композиции:

$$S = \boxtimes (M_1, M_2, \dots, M_k), \text{ где} \\ M_i = \langle E, Q_i, \delta_i, q_{0i} \rangle, i = \{1 - k\}$$

Особенностью такой композиции является то, что у автоматов-операндов, как и у результирующего автомата множество входных алфавитов одно и то же – это поле событий  $E$ , элементы которого являются события, глобальные для всех автоматов системы, и при наступлении которых автоматы осуществляют переходы из одного состояния в другое локальное состояние. Для этой операции будем рассматривать конечные полные автоматы-операнды в упрощенном виде – без выходного алфавита  $B$  и функции выхода  $\lambda$ . Ввиду того, что все автоматы системы работают в одном пространстве событий, отнесем множество событий  $E$  к самой системе  $S$ . В результате автоматы-операнды операции системной композиции будут описываться следующей конфигурацией:

$$M_i = \langle Q_i, \delta_i, q_{0i} \rangle.$$

Такие автоматы будем называть квазиавтоматами (КА). На самом деле упрощение автоматов практически не снижает общности решения задачи, так как при разработке автоматных моделей реальных систем с переходами автоматов из одного состояния в другое, с состояниями и событиями связываются семантические действия/функции, которые и производят необходимые выходные результаты работы автоматов, например, изменяют состояние информационной базы (базы данных  $D$ ) системы.

Далее для математического моделирования поведения двойников с помощью EMM-систем специализируем структуру КА, составляющих такие системы, а также интерпретацию их поведения.

Будем допускать разбиение состояний квазиавтоматов EMM-систем на непересекающиеся классы. Такие автоматы будем называть полисортными квазиавтоматами. Для рассматриваемой в статье задачи будем рассматривать КА с состояниями, разбитыми на два класса –  $A$  (состояния режимов функционирования объекта, моделируемого с помощью КА) и  $B$  (состояния производственной деятельности объекта). Такие КА будем называть двудольными КА или сокращенно ВРА (Bipartite automaton).

<sup>1</sup> ПНСТ 429-2020 Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения: предварительный национальный стандарт РФ: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 августа 2020 г. № 38-пнст: введен впервые: дата введения 2021-01-01 / подготовлен АО «ВНИИС», АО «РВК». М.: Стандартинформ, 2020.

<sup>2</sup> Кудрявцев В. Б., Алешин С. В., Подколзин А. С. Введение в теорию автоматов. М.: Наука, 1985. 320 с.



Как и в работе [1] для представления алгебры автоматов будем использовать метод диаграмм Мура<sup>3</sup> [2], позволяющий изображать автоматы/квазиавтоматы с помощью наглядной графической формы, состоящей из конечного множества вершин-состояний автомата/квазиавтомата и конечного множества направленных дуг, соединяющих две вершины (начальную и конечную). Разметка дуг таких графов осуществляется с помощью событий, вызывающих переход диаграммы из одного состояния в другое.

Особенности интерпретации введенных ВРА следующая. Класс *A*, содержит состояния, определяющие условия (режимы) для исполнения функций ВРА, моделирующих производственную деятельность объекта. Такими состояниями для ВРА, моделирующего работу некоторого устройства, являются, например, состояния «включено» (*ON*), «выключено» (*OFF*), «на ремонте» (*Repair*). Состояния этого класса реагируют на сигналы (события): *Start*, *Stop*, *Break*. Будем предполагать, что до включения ВРА в работу он находится в состоянии *OFF*, из которого переводится в рабочее состояние сигналом *Start*, который переключает ВРА в состояние *ON*.

При переключении ВРА в состояние *ON* автоматически осуществляется переход на входное состояние ВРА из множества состояний класса *B*. Таким входным состоянием для состояний класса *B* любого ВРА будем считать состояние *CurrentState*, в котором хранится текущее производственное состояние ВРА-устройства. При переходе в состояние *CurrentState* формируется внутренне событие, переводящее ВРА в соответствующее текущее состояние и дальше ВРА работает в соответствии с логикой выполнения производственных функций [20-23].

Если производится удаленный вызов ВРА из другого автомата (из некоторого состояния класса *B*) с помощью команд *call* или *fork*, то переход осуществляется в текущее состояние вызываемого ВРА транзитом через состояние *CurrentState*. При этом

в текущее состояние передаются параметры входного события для команд *call* или *fork*. Сигналы *Start*, *Stop*, *Break* не обрабатываются состояниями класса *B*. Эти события изменяют только состояния режимов. При переходах между состояниями класса *B*, т. е. производственными, возможность перехода определяет проверкой состояния режима автомата, которым должен быть рабочий режим (*ON*). Сигнал *Break* может быть вызван из любого производственного состояния ВРА, переводя последний в состояние режима *Repair*.

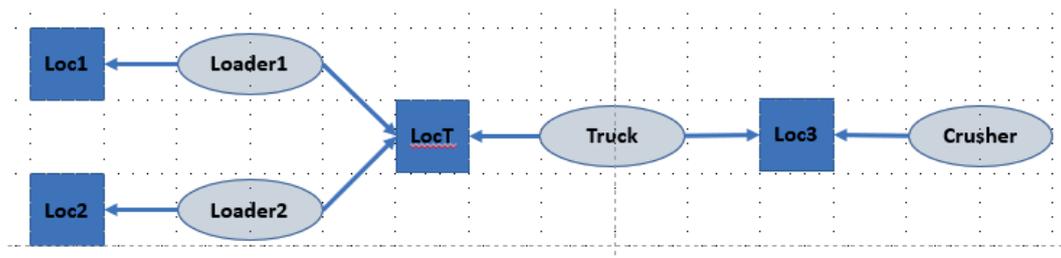
## 2. Пример применения метода двудольных квазиавтоматов для описания динамики функционирования оборудования в шахте

Рассмотрим применение метода двудольных квазиавтоматов на следующем примере.

Пусть требуется описать динамику функционирования оборудования в шахте *Mine*, состоящей из четырех локаций (туннелей) с именами *Loc1*, *Loc2*, *Loc3*, *LocT* (Класс объектов – *Location*) и оборудованием *Loader1*, *Loader2*, *Truck*, *Crusher* (Класс объектов – *Equipment*)<sup>4</sup> [24, 25].

В первых двух локациях производится добыча руды, загрузка ее в погрузчики (*Loader1*, *Loader2*) и доставка руды погрузчиками в *LocT*, где руда перегружается из погрузчиков в грузовик (*Truck*), который доставляет руду в *Loc3*, выгружает руду в дробильную машину (*Crusher*), которая осуществляет переработку (дробление) загруженной в нее руды и подъем ее на поверхность для дальнейшей транспортировки к месту использования.

Общая модель шахты (системы *Mine*) показана на рисунке 1.



Р и с. 1. Модель системы *Mine*, состоящей из квазиавтоматов (ВРА) *Loc1*, *Loc2*, *Loc3*, *LocT*, *Loader1*, *Loader2*, *Truck*, *Crusher*

F i g. 1. Model of *Mine* system consisting of quasi-automata (BPA) *Loc1*, *Loc2*, *Loc3*, *LocT*, *Loader1*, *Loader2*, *Truck*, *Crusher*  
Bipartite automaton (BPA)

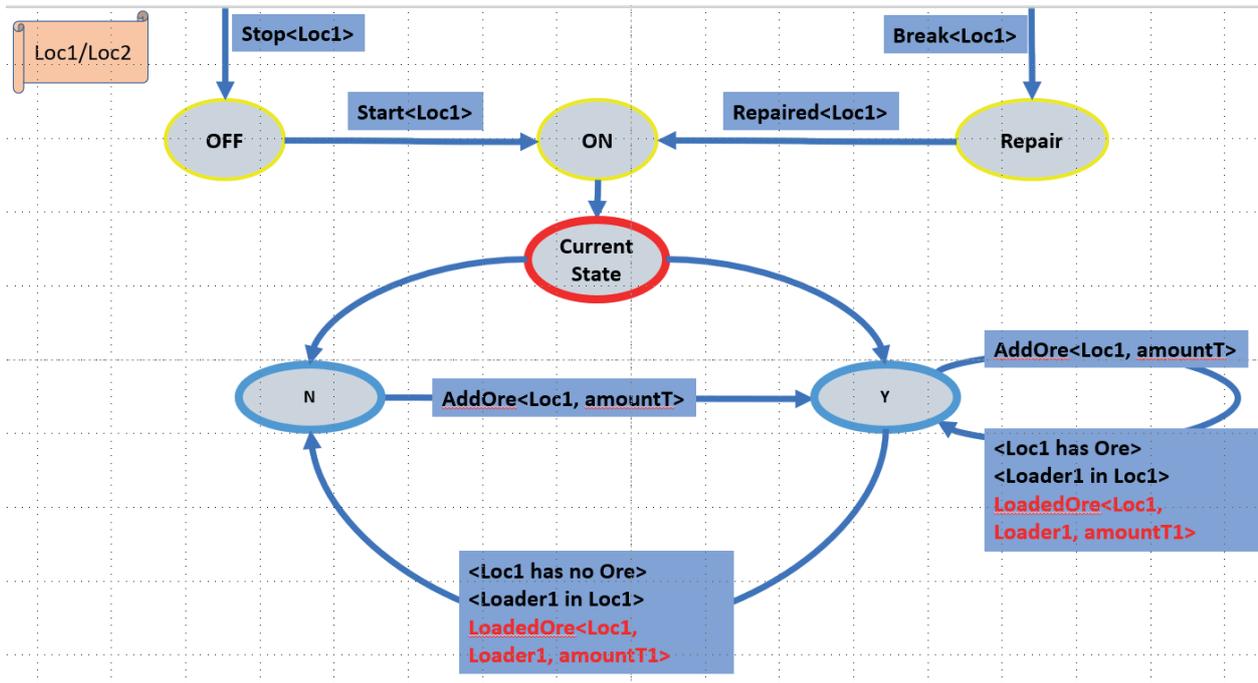
В модели системы *Mine* с представлением глобальными связующими событиями, отражающими связи между элементами системы и обеспечивающими взаимодействие и функционирование ВРА, входящих в ее состав, являются следующие события (указаны типы аргументов событий):

- *LoadingOre*<*Location*, *Equipment*> – начало погрузки руды из локации в оборудование
- *LoadedOre*<*Location*, *Equipment*, *amountT*> – итог погрузки руды из локации в оборудование определенного количества руды.

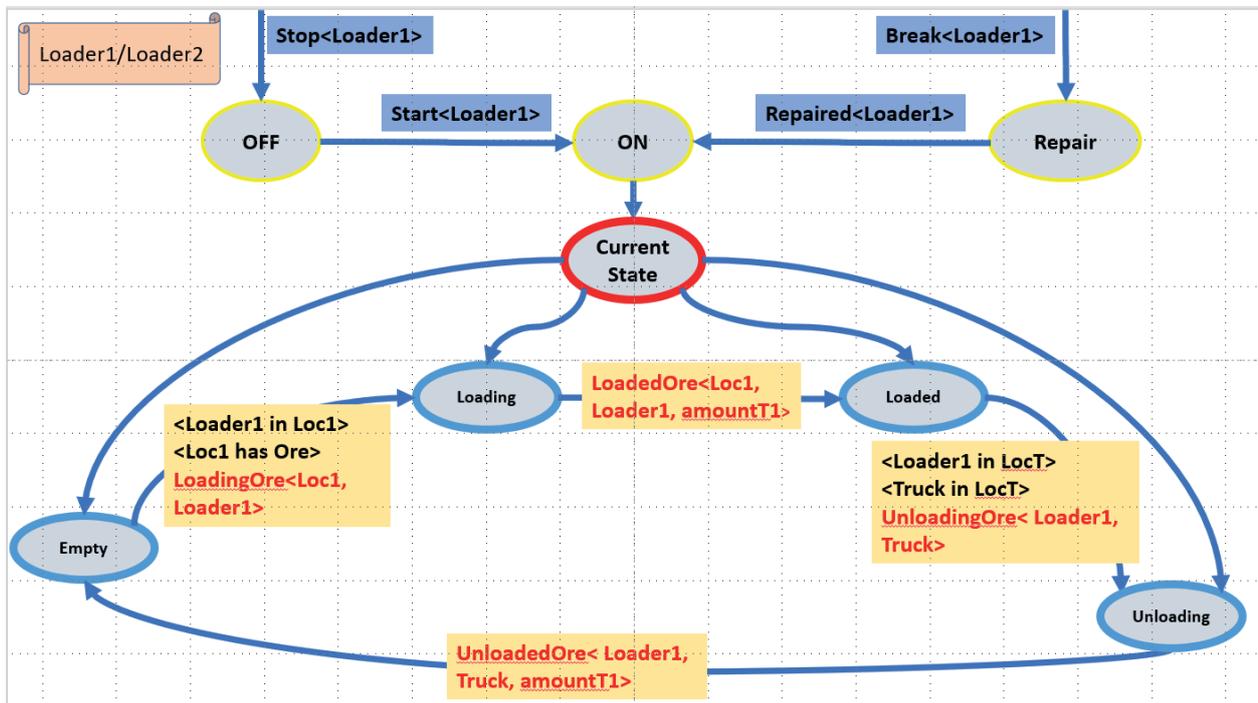
<sup>3</sup> Там же.

<sup>4</sup> ГОСТ Р 58494-2019 Оборудование горно-шахтное. Многофункциональные системы безопасности угольных шахт. Система дистанционного контроля опасных производственных объектов: национальный стандарт РФ: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 августа 2019 г. № 522-ст: введен впервые: дата введения 2020-01-01 / подготовлен АО «СУЭК», ЗАО РКСС, ООО НИИПМС, ООО НПФ «Гранч», ООО «НПП «Шахтпожсервис», ООО «Ингортех». М. : Стандартинформ, 2019.





Р и с. 2. Диаграмма функционирования локации *Loc1* и *Loc2*  
Fig. 2. Diagram of functioning of *Loc1* and *Loc2* locations



Р и с. 3. Диаграмма ВРА, моделирующая работу загрузчика *Loader1* и *Loader2*  
Fig. 3. BPA diagram simulating the operation of *Loader1* and *Loader2*

- *UnloadingOre<Equipment, Equipment>* – начало разгрузки руды из одного оборудование в другое. Например, из погрузчика в грузовик
- *UnloadedOre<Equipment, Equipment, amountT>* – итог разгрузки руды из одного оборудование в другое определенного количества руды. Например, из погрузчика в грузовик
- *RefinedOre<Crusher, amountT>* – событие дробилки о переработке и поднятии на поверхность определенного количества руды
- *AddOre<Location, amountT>* – событие, задающее количество руды в локации

Собственно модель функционирования шахты рассматриваемого примера представляется системой диаграмма двудольных автоматов, моделирующих работу каждого из объектов шахты.

На рисунке 2 показана диаграмма ВРА, описывающего поведения локации *Loc1*.

Состояния режимов работы локации (состояния класса *A*): *ON* (В работе), *OFF* (Выключена), *Repair* (На ремонте). Производственные состояния локации (состояния класса *B*): *N* (нет руды для загрузки), *Y* (есть руда для загрузки). Состояние *CurrentState* служит переключателем в одно из производственных состояний при включении ВРА *Loc1* сигналом *Start<Loc1>* или при вызове ВРА с помощью команд *call* и *fork*, из которого автомат продолжает выполнять свой производственный цикл. Если его текущее состояние *N*, то выполняется дополнительная добыча руды и по событию *AddOre<Loc1,amountT>* ВРА переходит в состояние *Y* (есть руда для загрузки), а затем, если

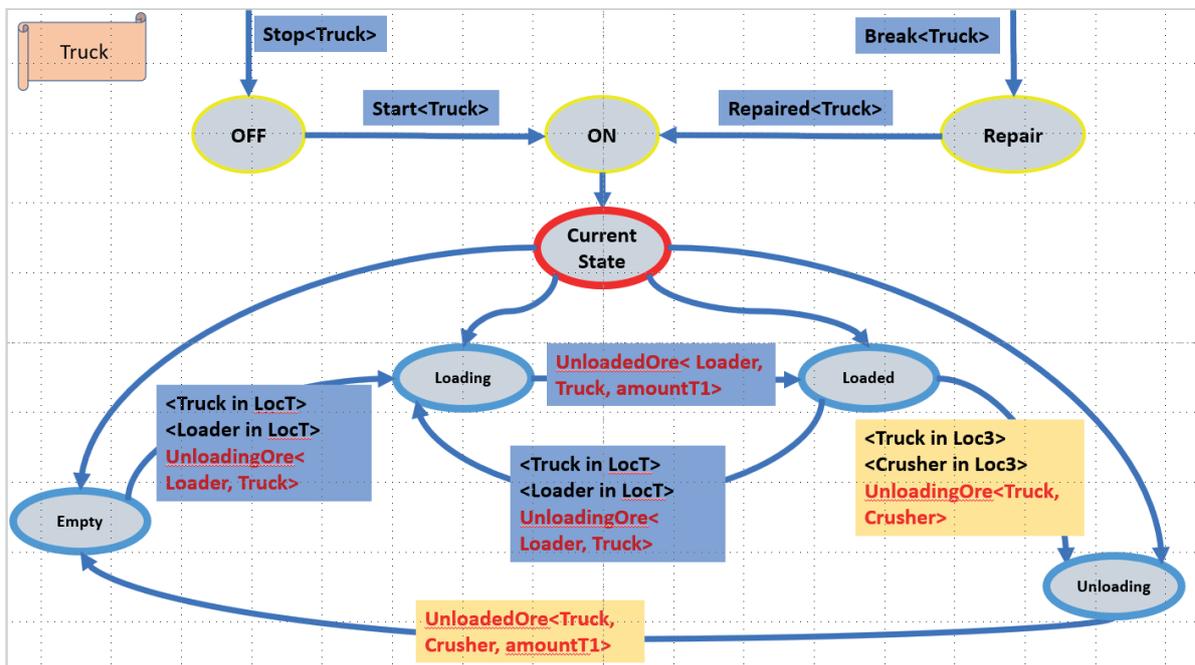
погрузчик *Loader1* находится в локации *Loc1*, что проверяется с помощью предусловия *<Loader1 in Loc1>*, начинается загрузка руды в загрузчик *Loader1* (событие - *LoadingOre<Loc1,Loader1>* активируемое автоматом *Loader1*). При завершении погрузки *Loader1* генерирует событие *LoadedOre<Loc1, Loader1, amountT1>*, которое сообщает, что погрузка завершена и из локации было изъято *amountT1* руды. Если руда в локации кончилась, то состояние *Loc1* изменяется на *N* и она будет готова повторить свой производственный цикл.

Событие *Break* (Поломка) может исходить из любого производственного состояния ВРА, но обрабатывается только в состояниях режимов *ON* или *OFF*, переводя автомат в состояние ремонта *Repair*.

События *Start* и *Stop* также интерпретируются состояниями режимов *OFF* и *ON* соответственно.

На рисунке 3 показана диаграмма ВРА, описывающая поведения загрузчика *Loader1* и *Loader2*.

Производственными состояниями загрузчика *Loader1* являются: *Empty* (Пустой), *Loading* (Загружается), *Loaded* (Загружен), *Unloading* (Выгружает руду в грузовик). Состояние *CurrentState* служит переключателем в одно из производственных состояний при вызове автомата с помощью команд *call* и *fork*, из которого автомат выполняет свой производственный цикл, пройдя последовательно состояния по замкнутому кругу от *Empty* до *Unloading*. Завершение выгрузки руды из загрузчика в грузовик сопровождается возбуждением события *UnloadedOre<Loader1, Truck>*.



Р и с. 4. Диаграмма автомата, моделирующего работу грузовика *Truck*  
F i g. 4. Diagram of an automaton simulating the operation of a *Truck*

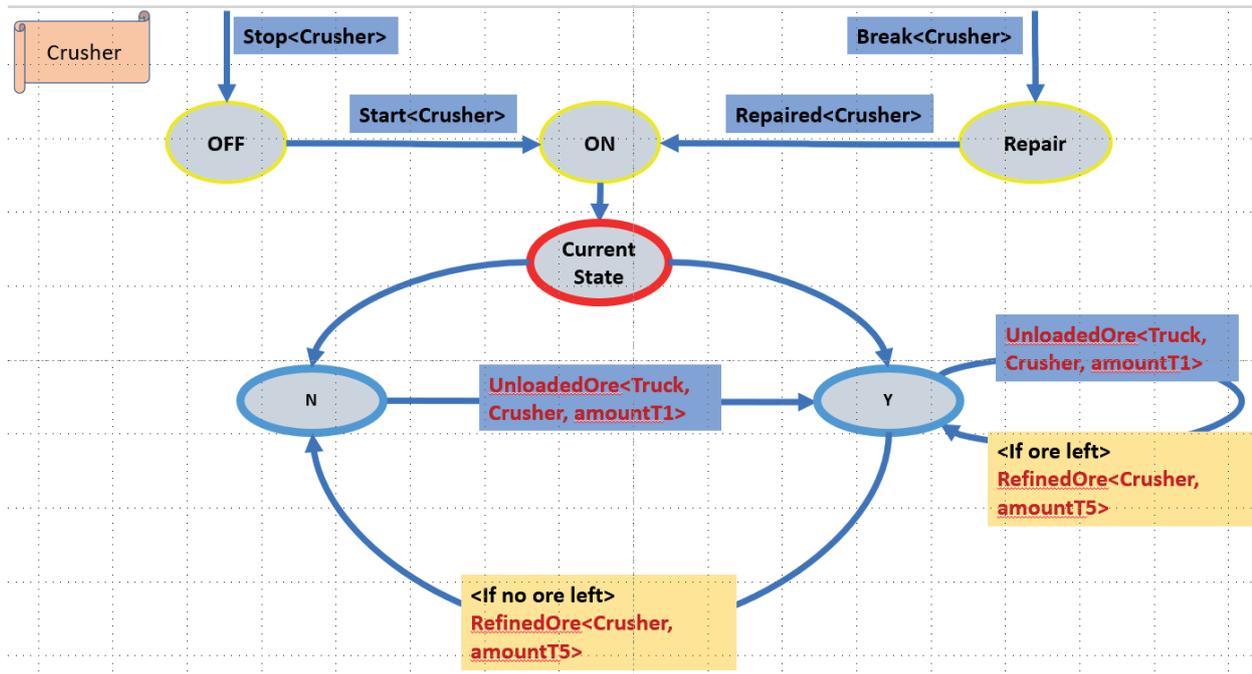
Грузовик проходит следующие производственные состояния: *Empty* (Пустой), *Loading* (Загружается погрузчиком), *Loaded* (Загружен), *Unloading* (Выгружает руду в дробилку), где пере-

ход из состояния *Empty* и *Loading* производится по событиям, создаваемых автоматом *Loader1*.

На рисунке 5 показана диаграмма ВРА, описывающая поведе-



ния дробилки *Crusher* в локации *Loc3* результатом чему является подъем обработанной руды массой *amountT* из шахты.



Р и с. 5. Показана диаграмма ВРА, описывающая поведение *Crusher* дробилки в локации *Loc3*  
F i g. 5. Shows the BPA diagram describing the *Crusher* behavior in *Loc3* location

Представленная в статье технология моделирования поведения горнодобывающих предприятий показала себя удобным инструментом для разработки математических поведенческих моделей различных конфигураций горнодобывающих предприятий. Предложенный авторами инструмент может быть использован при разработке полных программных двойников физических и цифровых активов не только рассматриваемой области. Для достижения этого разработанный алгебраический аппарат должен быть погружен в семантическую среду системы программирования, что предполагается рассмотреть в последующих работах.

## Заключение

В статье, которая является продолжением предыдущей работы авторов, посвященной разработке алгебры конечных автоматов специального вида DTA (Digital Twin Algebra) предназначенной для математического моделирования поведения

цифровых двойников производства [1], предложен новый метод моделирования функционирования дискретных систем с помощью систем конечных автоматов, согласованных по событиям (event matched machines – сокращенно – ЕММ-систем), в которых автоматы (квазиавтоматы) рассматриваются как имеющие специализированную многосортную структуру и соответствующую интерпретацию поведения. В частности, в данной статье рассмотрен метод двудольных автоматов, состояния которых, разбиты на два класса – *A* (состояния режимов функционирования объекта, моделируемого с помощью КА) и *B* (состояния производственной деятельности объекта), интерпретируемых специальным образом. Рассмотрен пример использования данного метода для описания функционирования оборудования и средств некоторой воображаемой шахты горнодобывающего предприятия, демонстрирующий наглядность и адекватность средств предложенного аппарата для моделирования поведения аналогичных объектов производства.

## Список использованных источников

- [1] Гапанович Д. А., Сухомлин В. А. Алгебра конечных автоматов как математическая модель цифрового двойника умного производства // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2022. Т. 18, № 2. С. 353-366. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202202.353-366>
- [2] Анализ подходов архитектурного проектирования цифровых двойников / Д. А. Гапанович, В. А. Тарасова, В. А. Сухомлин, В. П. Куприяновский // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10, № 4. С. 71-83. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48247621> (дата обращения: 03.06.2022).
- [3] Key Barriers of Digital Transformation of the High-Technology Manufacturing: An Evaluation Method / A. Borovkov [и др.] // Sustainability. 2021. Vol. 13, issue 20. Article number: 11153. doi: <https://doi.org/10.3390/su132011153>



- [4] Царев М. В., Андреев Ю. С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 7. С. 517-531. doi: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531>
- [5] Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors / S. Mittal [и др.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2019. Vol. 233, issue 5. P. 1342-1361. doi: <https://doi.org/10.1177/0954405417736547>
- [6] Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems ; ed. by J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. Cham: Springer, 2017. P. 85-113. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
- [7] Lim K. Y. H., Zheng P., Chen C. H. A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives // Journal of Intelligent Manufacturing. 2020. Vol. 31, issue 6. P. 1313-1337. doi: <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w>
- [8] Shop Floor Digital Twin in Smart Manufacturing: A Systematic Literature Review / A. Corallo [и др.] // Sustainability. 2021. Vol. 13, issue 23. Article number: 12987. doi: <https://doi.org/10.3390/su132312987>
- [9] Онтологии кибер-физических систем национального цифрового двойника Великобритании и BIM на примерах умных городов, железных дорог и других проектов / В. П. Куприяновский, Д. Е. Намиот, А. А. Климов [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. 2021. Т. 9, № 3. С. 91-130. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44853588> (дата обращения: 03.06.2022).
- [10] Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey / Y. Cheng [и др.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 97, issue 1-4. P. 1209-1221. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2001-2>
- [11] Глушков В. М. Абстрактная теория автоматов // Успехи математических наук. 1961. Т. 16, № 5(101). С. 3-62. URL: <https://www.mathnet.ru/links/7f686be2cd4cb8e024233027d8cf4e00/rm6668.pdf> (дата обращения: 03.06.2022).
- [12] Jacoby M., Usländer T. Digital Twin and Internet of Things – Current Standards Landscape // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, issue 18. Article number: 6519. doi: <https://doi.org/10.3390/app10186519>
- [13] A Digital Twin Architecture Based on the Industrial Internet of Things Technologies / V. Souza [и др.] // 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). IEEE Computer Society, 2019. P. 1-2. doi: <https://doi.org/10.1109/ICCE.2019.8662081>
- [14] Implementing an OPC UA interface for legacy PLC-based automation systems using the Azure cloud: An ICPS-architecture with a retrofitted RFID system / H. Haskamp, F. Orth, J. Wermann, A. W. Colombo // 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). IEEE Computer Society, 2018. P. 115-121. doi: <https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2018.8387646>
- [15] Review on cyber-physical systems / Y. Liu [и др.] // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 2017. Vol. 4, no. 1. P. 27-40. doi: <https://doi.org/10.1109/JAS.2017.7510349>
- [16] Developing a Dynamic Digital Twin at a Building Level: using Cambridge Campus as Case Study / V.Q. Lu [и др.] // International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC): Driving data-informed decision-making. ICE Publishing, 2019. P. 67-75. doi: <https://doi.org/10.1680/icsic.64669.067>
- [17] Digital twins: Understanding the added value of integrated models for through-life engineering services / R. Vrabič, J. A. Erkoyuncu, P. Butala, R. Roy // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 16. P. 139-146. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.167>
- [18] Shen W., Hao Q., Xue Y. A loosely coupled system integration approach for decision support in facility management and maintenance // Automation in Construction. 2012. Vol. 25. P. 41-48. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.04.003>
- [19] A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by Digital Twin / W. Luo [и др.] // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2020. Vol. 65. Article number: 101974. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101974>
- [20] Digital Twin as a Service (DTaaS) in Industry 4.0: An Architecture Reference Model / S. Aheleroff [и др.] // Advanced Engineering Informatics. 2021. Vol. 47. Article number: 101225. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101225>
- [21] Sepasgozar S. M. E. Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite a Smart, Sustainable Built Environment // Buildings. 2021. Vol. 11, issue 4. Article number: 151. doi: <https://doi.org/10.3390/buildings11040151>
- [22] Virtual, Digital and Hybrid Twins: A New Paradigm in Data-Based Engineering and Engineered Data / F. Chinesta [и др.] // Archives of Computational Methods in Engineering. 2020. Vol. 27, issue 1. P. 105-134. doi: <https://doi.org/10.1007/s11831-018-9301-4>
- [23] Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 21980-22012. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>
- [24] Лапин Э. С., Абдрахманов М. И. Формальное доказательство соответствия программной реализации используемых в системах контроля и управления моделей заданным требованиям // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2021. № 7. С. 99-108. doi: <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-7-99-108>
- [25] Особенности и тенденции цифровой трансформации российской горнодобывающей отрасли / Д. В. Лютягин, В. П. Яшин, Ю. В. Забайкин, М. А. Якунин // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2019. Т. 9, № 7А. С. 147-159. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41196200> (дата обращения: 03.06.2022).

*Поступила 03.06.2022; одобрена после рецензирования 25.08.2022; принята к публикации 20.09.2022.*



## Об авторах:

**Гапанович Дмитрий Антонович**, аспирант кафедры информационной безопасности факультета вычислительной математики и кибернетики, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (119991, Российская Федерация, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3222-694X>, dim.gapanovich@gmail.com

**Сухомлин Владимир Александрович**, заведующий лабораторией открытых информационных технологий факультета вычислительной математики и кибернетики, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (119991, Российская Федерация, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1); ведущий научный сотрудник Института проблем информатики РАН, ФГУ «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (119333, Российская Федерация, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44-2), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9468-7138>, sukhomlin@mail.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## References

- [1] Gapanovich D.A., Sukhomlin V.A. Algebra of Finite Automata as a Mathematical Model of the Digital Twin of Smart Production. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2022;18(2):353-366. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202202.353-366>
- [2] Gapanovich D.A., Tarasova V.A., Sukhomlin V.A., Kupriyanovsky V.P. Analysis of Approaches to the Architectural Design of Digital Twins. *International Journal of Open Information Technologies*. 2022;10(4):71-83. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48247621> (accessed 03.06.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [3] Borovkov A., Rozhdestvenskiy O., Pavlova E., Glazunov A., Savichev K. Key Barriers of Digital Transformation of the High-Technology Manufacturing: An Evaluation Method. *Sustainability*. 2021;13(20):11153. doi: <https://doi.org/10.3390/su132011153>
- [4] Tsarev M.V., Andreev Yu.S. Digital twins in industry: development history, classification, technologies, use cases. *Journal of Instrument Engineering*. 2021;64(7):517-531. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531>
- [5] Mittal S., Khan M.A., Romero D., Wuest T. Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2019;233(5):1342-1361. doi:10.1177/0954405417736547
- [6] Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen J., Flumerfelt S., Alves A. (eds.) *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham: Springer; 2017. p. 85-113. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
- [7] Lim K.Y.H., Zheng P., Chen C.H. A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2020;31(6):1313-1337. doi: <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w>
- [8] Corallo A., Del Vecchio V., Lezzi M., Morciano P. Shop Floor Digital Twin in Smart Manufacturing: A Systematic Literature Review. *Sustainability*. 2021;13(23):12987. doi: <https://doi.org/10.3390/su132312987>
- [9] Kupriyanovsky V. et al. The ontologies of cyber-physical systems of the national digital twin of Great Britain and BIM on the examples of smart cities, railways, and other projects. *International Journal of Open Information Technologies*. 2021;9(3):91-130. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44853588> (accessed 03.06.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [10] Cheng Y. et al. Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;97(1-4):1209-1221. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2001-2>
- [11] Glushkov V.M. The Abstract Theory of Automata. *Russian Mathematical Surveys*. 1961;16(5):1-53. doi: <https://doi.org/10.1070/RM1961v016n05ABEH004112>
- [12] Jacoby M., Usländer T. Digital Twin and Internet of Things – Current Standards Landscape. *Applied Sciences*. 2020;10(18):6519. doi: <https://doi.org/10.3390/app10186519>
- [13] Souza V. et al. A Digital Twin Architecture Based on the Industrial Internet of Things Technologies. In: 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). IEEE Computer Society; 2019. p. 1-2. doi: <https://doi.org/10.1109/ICCE.2019.8662081>
- [14] Haskamp H., Orth F., Wermann J., Colombo A.W. Implementing an OPC UA interface for legacy PLC-based automation systems using the Azure cloud: An ICPS-architecture with a retrofitted RFID system. In: 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). IEEE Computer Society; 2018. p. 115-121. doi: <https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2018.8387646>
- [15] Liu Y. Review on cyber-physical systems. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2017;4(1):27-40. doi: <https://doi.org/10.1109/JAS.2017.7510349>
- [16] Lu V.Q. et al. Developing a Dynamic Digital Twin at a Building Level: using Cambridge Campus as Case Study. In: International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC): Driving data-informed decision-making. ICE Publishing; 2019. p. 67-75. doi: <https://doi.org/10.1680/icsic.64669.067>
- [17] Vrabič R., Erkoyuncu J.A., Butala P., Roy R. Digital twins: Understanding the added value of integrated models for through-life engineering services. *Procedia Manufacturing*. 2018;16:139-146. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.167>



- [18] Shen W., Hao Q., Xue Y. A loosely coupled system integration approach for decision support in facility management and maintenance. *Automation in Construction*. 2012;25:41-48. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.04.003>
- [19] Luo W. et al. A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by Digital Twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020;65:101974. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101974>
- [20] Aheleroff S., Xu X., Zhong R.Y., Lu Y. Digital Twin as a Service (DTaaS) in Industry 4.0: An Architecture Reference Model. *Advanced Engineering Informatics*. 2021;47:101225. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101225>
- [21] Sepasgozar S.M.E. Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite a Smart, Sustainable Built Environment. *Buildings*. 2021;11(4):151. doi: <https://doi.org/10.3390/buildings11040151>
- [22] Chinesta F., Cueto E.G., Abisset-Chavanne E., Duval J.L., Khaldi F.E. Virtual, Digital and Hybrid Twins: A New Paradigm in Data-Based Engineering and Engineered Data. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2020;27(1):105-134. doi: <https://doi.org/10.1007/s11831-018-9301-4>
- [23] Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. *IEEE Access*. 2020;8:21980-22012. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>
- [24] Lapin E.S., Abdrakhmanov M.I. Formally proving whether the software implementation of models applied in instrumentation and control systems conform to the specified requirements. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021;(7):99-108. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-7-99-108>
- [25] Lyutyagin D.V., Yashin V.P., Zabaikin Yu.V., Yakunin M.A. Features and trends of the digital transformation of the Russian mining industry. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2019;9(7A):147-159. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41196200> (accessed 03.06.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 03.06.2022; approved after reviewing 25.08.2022; accepted for publication 20.09.2022.

#### About the authors:

**Dmitry A. Gapanovich**, Postgraduate Student of the Chair of Information Security, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University (1 Leninskie gory, Moscow 119991, GSP-1, Russian Federation), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3222-694X>**, [dim.gapanovich@gmail.com](mailto:dim.gapanovich@gmail.com)

**Vladimir A. Sukhomlin**, Head of the Open Information Technologies Lab, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University (1 Leninskie gory, Moscow 119991, GSP-1, Russian Federation); Leading Researcher of the Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, (44 Vavilov St., building 2, Moscow 119333, Russian Federation), Dr.Sci. (Tech.), Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9468-7138>**, [sukhomlin@mail.ru](mailto:sukhomlin@mail.ru)

All authors have read and approved the final manuscript.

