

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### УПРАВЛЕНИЕ ГОРНЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПОДХОДА

**Волкова Евгения Алексеевна**

ст. преп. каф. информатики, Уральский государственный горный университет,  
620144, РФ, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, дом №30  
E-mail: [evgeniya.volkova@m.ursmu.ru](mailto:evgeniya.volkova@m.ursmu.ru)

**Дружинин Алексей Владимирович**

канд. техн. наук, доц., зав. каф. информатики, Уральский государственный горный университет,  
620144, РФ, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, дом №30  
E-mail: [aleksey.druzhinin@m.ursmu.ru](mailto:aleksey.druzhinin@m.ursmu.ru)

**Полузадов Владимир Николаевич**

канд. техн. наук, проф. каф. электротехники, Уральский государственный горный университет,  
620144, РФ, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, дом №30  
E-mail: [vladimir.poluzadov@m.ursmu.ru](mailto:vladimir.poluzadov@m.ursmu.ru)

**Копанев Александр Александрович**

асс. каф. информатики, Уральский государственный горный университет,  
620144, РФ, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, дом №30  
E-mail: [vladimir.poluzadov@m.ursmu.ru](mailto:vladimir.poluzadov@m.ursmu.ru)

### MINING MANAGEMENT BASED ON THE MULTIAGENT APPROACH

**Evgeniya Volkova**

senior lecturer of Informatics Department, Ural State Mining University,  
620144, Russia, Ekaterinburg, Kuibysheva Street, 30

**Alexey Druzhinin**

candidate of Technical Sciences, associate professor, Head of Informatics Department, Ural State Mining University,  
620144, Russia, Ekaterinburg, Kuibysheva Street, 30

**Vladimir Poluzadov**

candidate of Technical Sciences, Professor of Electrical Engineering Department, Ural State Mining University,  
620144, Russia, Ekaterinburg, Kuibysheva Street, 30

**Alexander Kopanev**

assistant of Informatics Department, Ural State Mining University,  
620144, Russia, Ekaterinburg, Kuibysheva Street, 30

### АННОТАЦИЯ

Наиболее затратной частью технологического процесса добычи полезного ископаемого карьерным способом является погрузка и транспортировка.

На большинстве предприятий планирование работы экскаваторно-автомобильных комплексов ведется без учета существенных различий в технико-эксплуатационных показателях работы автосамосвалов и экскаваторов, взаимодействующих как единый автомобильно-экскаваторного комплекс. Организация ритмичной работы автомобильно-экскаваторного комплекса предполагает обеспечение равномерной загруженности экскаватора, отсутствие задержек в процессе маневрирования автомобилей при въезде на погрузочные площадки и съезде с них, стабильную продолжительность погрузки. Эффективность планирования рабочего процесса зависит от выбранных критериев диспетчеризации.

В данной статье рассматриваются проблемы, возникающие при управлении горнотранспортными комплексами и предлагаются возможные решения этих проблем.

Концептуальное моделирование позволило выделить «узкое место» в АСУ диспетчеризации - сущность "экспертная система", которая в большинстве систем представлена в виде пункта диспетчеризации или пункта управления.

Решением проблем, связанных с повышенной нагрузкой на один из блоков системы, является децентрализация системы управления, что возможно благодаря мультиагентному подходу к управлению.

Моделирование системы горнотранспортного комплекса показало повышение точности идентификации технологических состояний горных машин при мультиагентном подходе к управлению, что позволит сократить технологические простои, повысить производительность как отдельных агрегатов, так и системы в целом, снизить затраты на обслуживание техники, повысить качество конечного продукта.

#### ABSTRACT

The most expensive part of the technological process of open pit mining is loading and transportation part.

Most companies excavator-automobile complexes work planning is conducted without taking significant differences in the technical and operational characteristics of the work of dump trucks and excavators into account, interacting as a single complex motor-excavator. Organization of road-smooth operation of the complex involves excavating to ensure uniform load of the excavator, the absence of delays in the process of maneuvering vehicles at the entrance to loading bays and exits and stable duration of loading. Workflow efficiency of planning depends on the selected scheduling criteria.

This article discusses the problems that arise in the management of mining and transport systems and suggests possible solutions to these problems.

Conceptual modeling has allowed to identify the "bottleneck" in the automation of dispatching - the essence of "expert system", which in most systems is presented in the form of points or dispatching control center.

Solving the problems associated with an increased load on one of the units of the system, it is the decentralization of management that is possible due to the multi-agent approach to management.

Modelling of mining and transport complex systems showed improved accuracy of identification of technological conditions of mining machines with multi-agent campaign management, which will reduce process downtime, improve performance of individual units and the system as a whole, reduce the cost of maintenance of equipment, improve the quality of the final product.

**Ключевые слова:** открытые горные работы, экскаваторно-автомобильный комплекс, вложенные сети Петри, мультиагентное управление.

**Keywords:** open pit mining, excavator-truck complex, NP-nets, multiagent control.

В настоящее время основными задачами автоматизации открытых горных работ являются максимизация добычи, повышение эффективности эксплуатации и срока службы горнодобывающей и транспортной техники, минимизация затрат на проведение открытых горных работ. При этом, наиболее затратной частью технологического процесса добычи полезного ископаемого карьерным способом является погрузка и транспортировка. По данным, указанным в [3], доля транспортных расходов в себестоимости открытой добычи составляет 57 – 75%.

Горнотранспортный комплекс – это совокупность горных машин, предназначенных для погрузки, транспортировки, отгрузки вскрышных пород и полезных ископаемых.

Чаще всего встречается сочетание экскаваторов-драглайнов на вскрыше, экскаваторов-прямых лопат на погрузке и автомобильного и железнодорожного транспорта на транспортировке. Вскрышные и добычные работы на карьерах выполняются преимущественно экскаваторно-автомобильными комплексами (ЭАК) большой единичной мощности [1]. Типы используемого добычного, вскрышного и транспортного оборудования зависят от технологической схемы разработки карьера, при этом в процессе развития месторождения парк оборудования обновляется и становится все более и более разнородным.

На большинстве предприятий планирование работы экскаваторно-автомобильных комплексов ведется без учета существенных различий в технико-эксплуатационных показателях работы автосамосвалов и экскаваторов, взаимодействующих как единый автомобильно-экскаваторного комплекс. Организация ритмичной работы автомобильно-экскаваторного комплекса предполагает обеспечение равномерной загруженности экскаватора, отсутствие задержек в процессе маневрирования автомобилей при въезде на погрузочные площадки и съезде с них, стабильную продолжительность погрузки [2]. Формирование план-заданий и сменных планов для автомобильно-экскаваторных комплексов формируются либо по принципу «закрытого цикла», когда каждый самосвал назначается на работу с конкретным экскаватором на всю смену, либо по принципу «статической оптимизации», когда самосвал назначается на работу с экскаватором в режиме реального времени посредством диспетчера. Первый вариант показал себя как крайне неэффективный, а эффективность второго в значительной мере зависит от выбранных критериев диспетчеризации.

Управление горнотранспортным комплексом усложняется возможностью возникновения внештатных ситуаций (аварий, поломок, чрезвычайных ситуаций), на которые требуется реагировать в кратчайшие сроки.

Концептуальную модель управления горными работами как объекта управления можно представить в виде контекстной диаграммы (рисунок 1).

Как видно из рисунка 1, экспертная система является ключевой сущностью, на которую приходится основная часть функциональной нагрузки. На разных

предприятиях роль экспертной системы выполняют разные программно-аппаратные (программные), а иногда и полностью неавтоматизированные комплексы решений, не отличающиеся высокой надежностью и отказоустойчивостью.

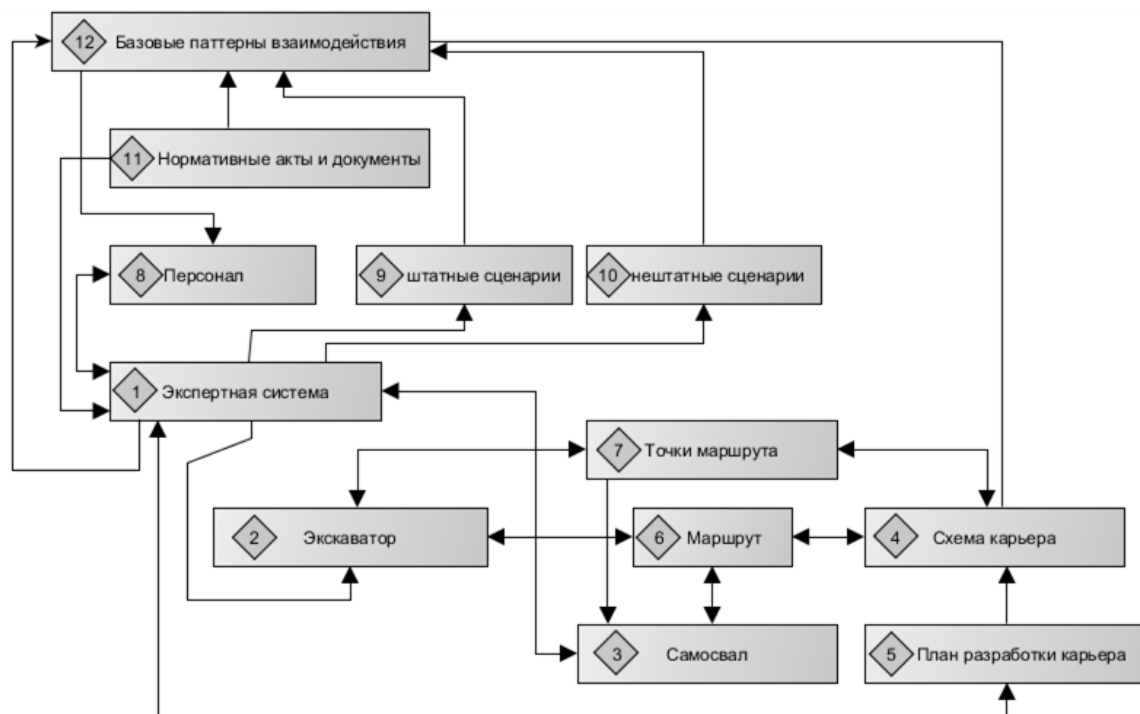


Рисунок 1. Контекстная диаграмма объекта автоматизации

Также следует отметить нерелевантное распределение рабочих ресурсов в данных комплексах, что влечет за собой невозможность быстрой адаптации к изменившимся внешним/внутренним условиям, низкую степень отклика, высокую зависимость от ошибок, связанных с человеческим фактором. Попытка автоматизировать и систематизировать рабочий процесс в большинстве случаев приводит к потере персональных свойств и характеристик сущностей, а также к недостаточному сосредоточению внимания на нюансах и деталях программной, аппаратной и агрегатной частей комплекса.

Сущности, представленные в данной контекстной диаграмме:

1) экспертная система – набор функций, правил и действий, позволяющий организовать и/или оптимизировать (видоизменить) поведение участников рабочего процесса для обеспечения целевых функций предприятия;

2) экскаватор – аппаратно-агрегатная часть комплекса, отвечающая за процессы экскавации и погрузки горных пород; подразумевается, что расположение экскаваторов совпадает с некоторыми точками маршрута (погрузочные площадки);

3) самосвал – аппаратно-агрегатная часть комплекса, отвечающая за процессы перевозки и отгрузки горных пород; движение самосвалов происходит по маршруту, определенному экспертной системой;

4) схема карьера – план размещения объектов (забои, дороги, погрузочные площадки, места разгрузки, технические строения) на геолого-геодезическом участке работ, меняющийся в процессе работ;

5) план разработки карьера – комплекс документов, регламентирующих те или иные действия/комплекс действий, связанных с рабочим процессом или его реализацией; допускается изменение плана разработки карьера непосредственно в процессе работы; план разработки карьера состоит из схем карьера на разных этапах жизненного цикла, перечня рабочего и вспомогательного оборудования, перечня ответственных лиц и т.д.;

6) маршрут – участок между двумя точками; определяется экспертной системой; между двумя точками может быть более одного маршрута;

7) точки маршрута – ключевые пункты маршрута следования горной техники;

8) персонал – операторы горных машин и работники административных структур карьера;

9) штатные сценарии – сценарии поведения участвующих сущностей в случае возникновения типовых ситуаций, связанных с рабочим процессом (например, начало рабочей смены, изменение маршрута, плановый ремонт);

10) нештатные сценарии – сценарии поведения участвующих сущностей в случае возникновения нетиповых или форс-мажорных ситуаций, связанных с

рабочим процессом (например, обвал борта карьера, заводнение участка маршрута.);

11) нормативные акты и документы – нормы и правила, регламентирующие рабочие и административные процессы горного предприятия; часть документов определяется международными и российскими стандартами и подлежит обязательному исполнению, а часть являются локальными для конкретного предприятия или его организационной единицы и могут изменяться при различных условиях;

12) базовые паттерны взаимодействия – набор универсальных решений для реакции на типовые сценарии взаимодействия.

Решить задачи управления горнотранспортным комплексом наиболее эффективным образом может помочь применение мультиагентного подхода. В основе этого подхода лежит понятие интеллектуальных агентов. В отличие от распределенных систем, в которых знания и ресурсы распределяются между агентами, но управление происходит посредством органа общего командного управления, в мультиагентных системах решение получается на основе взаимодействия самостоятельных агентов. Одно из ключевых полезных свойств агентов — это интеллектуальное поведение, которое может быть заложено в каждого из них в соответствии с общим подходом к решению задачи (на основе базовых паттернов взаимодействия). Преимущество мультиагентных систем заключается в способности динамически адаптироваться к изменяющимся условиям, что позволяет говорить о возможности создания на основе данного подхода динамически реконфигурируемой интеллектуальной системы управления.

Агент представляется в виде (1):

$$A_g = \langle G, S, A, \theta, \varphi \rangle, \quad (1)$$

где  $G$  – целевая функция,  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  – набор параметров состояния,  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  – набор действий,  $\theta$  – база знаний и  $\varphi$  – оператор.

Важным моментом для определения поведения объекта является идентификация его состояния  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ .

В случае с горнотранспортным комплексом, основными интеллектуальными агентами являются укрупненные узлы системы – экскаваторы и самосвалы. Их технологические циклы связаны, что позволяет нам получать более точные данные о технологическом состоянии агентов за счет их обмена данными. При этом агенты-самосвалы и агенты-экскаваторы могут быть представлены как мультиагентные сети.

Например, с кинематической точки зрения мультиагентная сеть экскаватора может быть представлена множеством агентов (2):

$$A_{ex} = \{A_{dr}, A_{dl}, A_{dp}, A_e, \dots, A_n\}, \quad (2)$$

где  $A_{dr}$ ,  $A_{dl}$ ,  $A_{dp}$  – главные привода ( $A_{dr}$  – привод поворота,  $A_{dl}$  – привод подъема,  $A_{dp}$  – привод напора),  $A_e$  – вспомогательное оборудование,  $A_n$  – агент внешней среды.

С конструктивной точки зрения можно выделить такие агенты, как рукоять, ковш, поворотная платформа и ходовая часть (3):

$$A_{ex} = \{A_b, A_a, A_r, A_m\}, \quad (3)$$

где  $A_b$  – ковш,  $A_a$  – рукоять,  $A_r$  – поворотная платформа,  $A_m$  – ходовая часть.

Тогда мультиагентную систему экскаватора можно представить в виде раскрашенной вложенной сети Петри (см. рисунок 2).

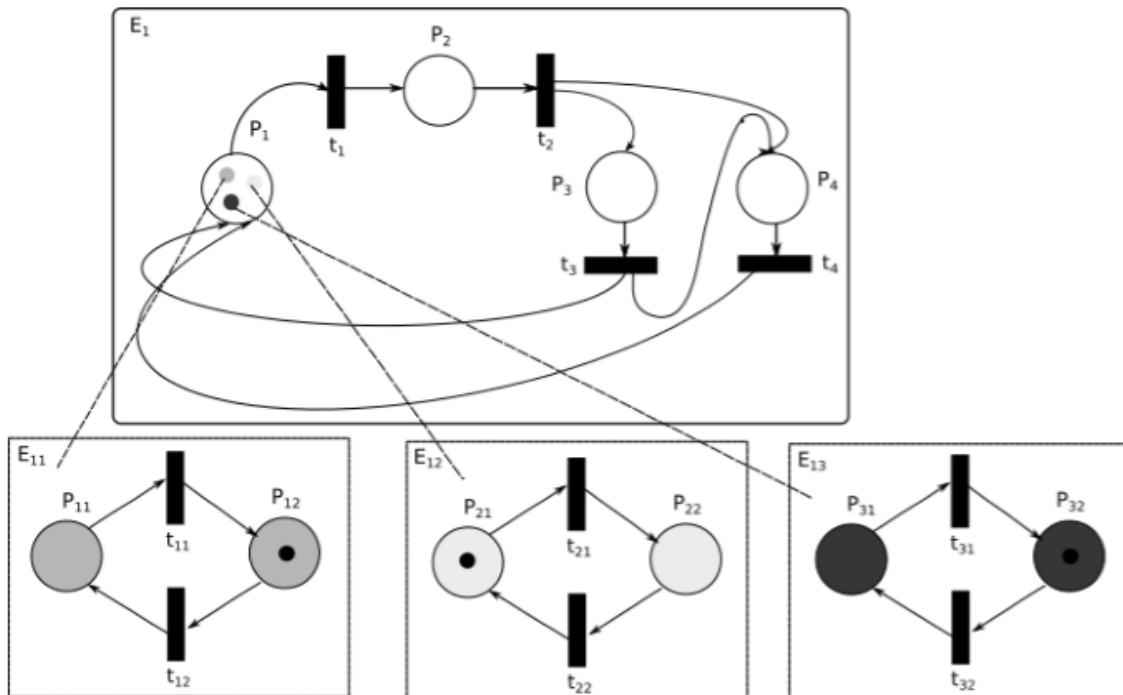


Рисунок 2. Рабочий цикл экскаватора как мультиагентная сеть

На рисунке 2, в сети  $E_1$  состояние  $P_2$  соответствует загрузке, состояние  $P_1$  – готовности к загрузке,  $P_3$  – подготовке забоя,  $P_4$  – простое, сеть  $E_{11}$  – сеть поворотной платформы,  $E_{12}$  – сеть рукояти стрелы,  $E_{13}$  – сеть ковша. Состояния  $P_{11}$  и  $P_{12}$  – платформа, повернутая к самосвалу и к забою соответственно,  $P_{21}$  и  $P_{22}$  – опущенная и поднятая рукоять,  $P_{31}$  и  $P_{32}$  – открытый и закрытый ковш. Начальные состояния  $\{P_{12}, P_{21}, P_{32}\}$  – экскаватор повернут к забою, рукоять опущена, ковш закрыт.

При этом переходы между состояниями имеют ряд ограничений, например, чтобы сеть  $E_1$  перешла из состояния  $P_2$  в состояние  $P_3$ , сеть  $E_{11}$  должна находиться в состоянии  $P_{12}$ , сеть  $E_{12}$  – в состоянии  $P_{21}$ , а сеть  $E_{13}$  – в  $P_{32}$ . Наличие ограничений в переходах между состояниями позволяет достаточно точно

определить технологическое состояние экскаватора, а обмен данными с агентом-самосвалом, который участвует в процессе загрузки, позволяет определить технологическое состояние с вероятностью в 99%.

Точное определение технологического и технического состояния агентов-горных машин позволит обеспечить повышение эффективности и срока службы агрегатов за счет перераспределения нагрузок и эффективного управления приводами, поможет при решении задач анализа и прогнозирования состояния рабочей среды и объектов инфраструктуры. Решение поставленных задач позволит сократить технологические простои, повысить производительность как отдельных агрегатов, так и системы в целом, снизить затраты на обслуживание техники, повысить качество конечного продукта.

### Список литературы:

1. Анистратов К.Ю. Мировые тенденции развития структуры парка карьерной техники // Горная промышленность. – 2011. – №6. – С. 22-26.
2. Мариев П.Л. Карьерный автотранспорт: состояние и перспективы / П.Л. Мариев, А.А. Кулешов, А.Н. Егоров, И.В. Зырянов. – СПб.: Наука, 2004. – 429 с.
3. Трубецкой К.Н., Клебанов А.Ф., Владимиров Д.Я. Автоматизация управления горно-транспортными комплексами в карьерах. // Горный журнал. - 2009. - № 11. - С. 38-41.

### References:

1. Anistratov K.Ju. World trends in fleet structure of mining equipment. Gornaja promyshlennost' [Mining Industry]. 2011, no.6, pp. 22-26 (In Russian).
2. Mariev P.L. Career vehicles: state and prospects. St.Petersburg, Nauka Publ., 2004, 429p. (In Russian).
3. Trubeckoj K.N., Klebanov A.F., Vladimirov D.Ja. Automation of mining and transport complex in open pits. Gornyj zhurnal [Mining Journal]. 2009, no.11, pp. 38-41 (In Russian).