

УДК 622.68:004.94

Бахтурин Юрий Алексеевич

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник
лаборатории транспортных систем
карьеров и геотехники,
Институт горного дела УрО РАН,
620075 г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: bakh2008@yandex.ru

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ
ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ КАРЬЕРОВ
НА ОСНОВЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ
ИНТЕРАКТИВНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ
МОДЕЛИ****Аннотация:*

Проанализированы технологии адаптации технических систем. Обосновано применение метода имитационного моделирования. Показано, что для решения задач параметрической адаптации транспортных систем карьеров целесообразно создать максимально универсальную модель системы моделирования транспортных процессов, позволяющей как оптимизировать их, так и принимать рациональные решения в соответствии с логикой организации движения транспортных средств. Приводятся результаты решения различных задач с применением универсальной интерактивной имитационной модели. Приведены примеры решения следующих оптимизационных задач: обоснование провозной способности схем путевого развития карьерного железнодорожного транспорта для условий Качканарского ГОКа; оптимизация параметров перегрузочных складов при автомобильно-конвейерно-железнодорожном транспорте. На основе многофакторных экспериментов с применением имитационного моделирования получены зависимости производительности системы автомобильно-конвейерно-железнодорожного транспорта от глубины размещения комплекса перегрузки и вместимости склада, а также от вместимости бункеров и числа поездов в работе. Установлены закономерности изменения сменных объемов перевозок горной массы железнодорожным транспортом. На этой основе определена провозная способность схемы путевого развития рудовозного района. Рассмотрено решение задач, решаемых с применением модели с интерактивным вмешательством в организацию транспортного процесса: определение сменной производительности горнотранспортных систем при различных сочетаниях основного технологического оборудования в конкретных горнотехнических условиях.

Ключевые слова: параметрическая адаптация, интерактивная имитационная модель, транспортная система, карьер, провозная способность, комплексы перегрузки

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.04.071

Bakhtourin Yury A.

Candidate of Technical Sciences,
Chief Research Worker,
Laboratory of open pit transport systems
and geotechnics,
Institute of Mining UB RAS,
620075, Ekaterinburg,
Mamina-Sibiryaka str., 58
e-mail: bakh2008@yandex.ru

**PARAMETRIC ADAPTATION
OF THE OPEN PIT TRANSPORT SYSTEMS
ON THE BASIS OF UNIVERSAL
INTERACTIVE SIMULATION MODEL***Abstract:*

Technologies of adaptation of technical systems have been analyzed. The application of the simulation method has been justified. It is shown that in order to solve the problems of parametric adaptation of transport systems of open pits, it is advisable to create the most universal model for the system of modeling the transport processes, which allows both to optimize them according to certain criteria and to make rational decisions in accordance with the organization logic of the vehicles movement. The results of solving various problems by using the universal interactive simulation model are being presented. Examples of solving the following optimization problems are given: substantiation of carrying capacity of track development schemes of quarry rail transport for the conditions of Kachkanar MPP; optimization of parameters of transshipment warehouses in road-conveyor-railway transport. On the basis of multi-factorial experiments using the simulation dependencies we have received the efficiency of road-conveyor-railway transport according to the depth of placement of the complex and the overload of the storage capacity and the capacity of the transport bins and the number of trains. On this basis of the carrying capacity of the track development scheme of the ore-bearing area is defined. The solution of the problems managed with the use of the model with interactive intervention into the organization of the transporting process is considered: determination of the changing productivity of mining transport systems with different combinations of the main technological equipment in specific mining conditions.

Key words: parametric adaptation, universal interactive simulation model, transport system, quarry, carrying capacity, transshipment complexes

* Исследование выполнено в рамках государственного задания 007-00293-18, тема № 0405-2018-0015.

В ряде основополагающих работ, посвященных вопросам формирования транспортных систем карьеров, член-корр. РАН В.Л. Яковлев показал, что содержательную основу их эволюции составляет адаптация «сложной социально-экономической системы, какой является горнодобывающее предприятие, к воздействиям внешней среды» [1 – 3]. Вопросам методологического и методического обеспечения адаптации (адаптивного управления) технических систем применительно к изменяющимся условиям, в которых реализуются те или иные процессы, уделяется повышенное внимание исследователей. Исследования в этой области могут быть как самого общего методологического плана [4 – 12], так и непосредственно касающимися транспортно-логистических систем [13 – 23]. При этом особое место занимают методические вопросы адаптации собственно транспортных систем карьеров [1 – 3, 24 – 30]. В адаптационных процессах транспортных систем карьеров можно выделить 3 иерархических уровня: параметрическая адаптация, структурная адаптация, структурно-параметрическая адаптация. Статья посвящена вопросам параметрической адаптации, которая связана с регулированием параметров системы без изменения их структуры.

Постановка задачи

В вопросах параметрической адаптации транспортных процессов можно выделить 2 класса задач. Один связан с оптимизацией какого-либо параметра процесса, а другой – с обеспечением достижения цели при условии бесконфликтного протекания самого процесса. В первом случае на основе априорной информации или эксперимента можно решать задачу оптимизации. Во втором – процессы развиваются в условиях неопределенности, что не позволяет решать задачу оптимизации процесса. Это требует наличия такой логики поведения, которая позволила бы оперативно реагировать на возникающие возмущения и принимать такие решения, которые, с одной стороны, дают возможность достижения цели, с другой – могут гарантировать бесконфликтное развитие процесса и добиться более совершенного его протекания. Таким образом, для решения задач параметрической адаптации транспортных систем карьеров целесообразно создание максимально универсальной модели транспортных процессов, позволяющей как оптимизировать их по тем или иным критериям, так и принимать рациональные решения в соответствии с логикой организации движения транспортных средств.

Методы исследований

Наиболее универсальным, позволяющим реализовать основные требования к определению характеристик функционирования сложных транспортных систем, можно считать метод имитационного моделирования, сущность которого состоит в компьютерном воспроизведении реальных процессов с учетом их вероятностного характера с помощью специально построенной математической модели. Целесообразность применения имитационных моделей обусловлена следующим [24 – 30]:

1. Структурной и функциональной сложностью систем, аналитическое описание которых затруднено. Имитационные модели могут быть построены без привлечения сложного математического аппарата при обязательном сохранении их логической структуры.
2. Имитационные модели непосредственно воспроизводят реальный процесс при помощи вычислительно-логических алгоритмов, обеспечивая учет взаимодействия элементов горно-транспортной системы.
3. Имитационные модели наиболее результативны при исследовании системы в динамике.
4. Возможностью интерактивного вмешательства в процесс моделирования.

В ИГД УрО РАН разработана и реализована универсальная интерактивная имитационная модель функционирования горно-транспортной системы карьера [31]. Универсальность модели заключается в следующем:

1. Она воспроизводит процесс транспортирования горной массы для всех основных видов карьерного транспорта.
2. Модель может использоваться для решения широкого круга задач.
3. За счет возможности интерактивного вмешательства можно «проигрывать» любые варианты транспортирования горной массы.

Модель работы карьерного железнодорожного транспорта можно описать так. Движение составов воспроизводится в соответствии со схемой путевого развития путей карьерного железнодорожного транспорта (рис. 1). Пользователь имеет возможность самостоятельно задавать параметры транспортной системы: информацию по участкам путевой схемы, маршруты, число и расположение мест погрузки и приема горной массы, количество типов горной массы, полезную массу поездов и скорость их движения по участкам, тип экскаваторов и др. Ввод информации осуществляется путем заполнения соответствующих таблиц базы данных. В начале моделирования пользователь задает расположение составов на путевой схеме на момент начала моделирования (номер участка, время до конца операции, номер состава, вид горной массы), а также назначенное время моделирования. Моделирование происходит автоматически, когда состав переводится на первый свободный участок согласно матрице переводов. Предусмотрена возможность явного указания пользователем в интерактивном режиме следующей станции для состава. С применением модели решены задачи параметрической адаптации обоих классов. Рассмотрим некоторые из них.

Оптимизационные задачи

1. Обоснование провозной способности схем путевого развития карьерного железнодорожного транспорта.

С использованием предложенной модели проведены исследования и обоснование провозной способности схемы путевого развития карьеров Качканарского ГОКа. В качестве исходных данных использованы результаты статистической обработки данных большого числа наблюдений по элементам цикла технологических поездов за длительный период времени.

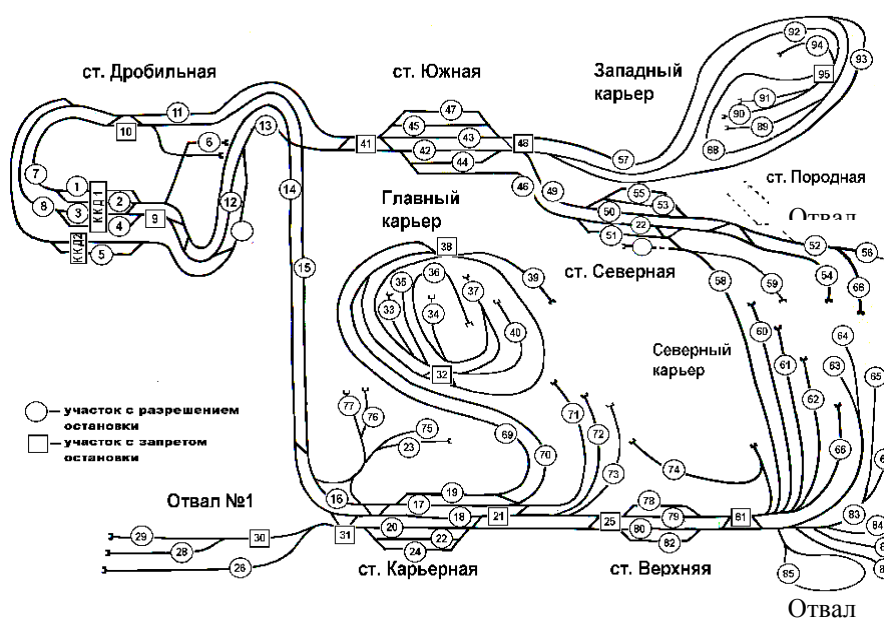


Рис. 1 – Схема путевого развития железнодорожного транспорта рудовозного района Качканарского ГОКа

«Проигрывались» различные варианты сочетаний основного погрузочного и транспортного оборудования. При этом число экскаваторов в работе изменялось от 14 до 30, поездов – от 18 до 32 ед. (рис. 2). При фиксированном числе экскаваторов и изменении числа локомотивосоставов и постоянном числе поездов и изменении числа экскаваторов пропорциональное изменение сменных объемов перевозок горной массы имеет место до некоторого предела. При определенных значениях N_3 и $N_{лс}$ темпы прироста снижаются вплоть до нуля. Когда в работе находится 21 локомотивосостав, увеличение числа экскаваторов свыше 18 не дает существенного прироста сменной производительности, а при числе экскаваторов порядка 20 – 22 наступает «насыщение» по сменным объемам перевозок.

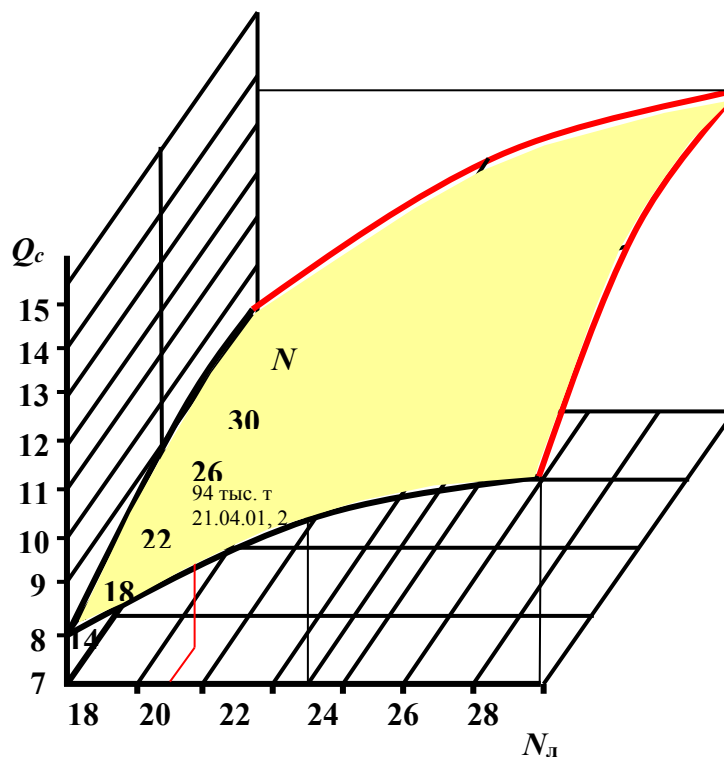


Рис. 2 – Зависимость сменных объемов перевозок железнодорожным транспортом рудовозного района ($Q_{см}$) от числа поездов ($N_{лс}$) и экскаваторов (N_3) в работе

При $N_{лс} = 32$ ед. аналогичное «насыщение» наступает уже при N_3 порядка 29 – 30 ед. и соответствует сменной производительности по горной массе 135 – 139 тыс. т. При $N_3 = 16$ объемы перевозки горной массы пропорционально растут только с увеличением количества поездов до 21 – 22. При увеличении числа поездов общие объемы перевозок растут, но темпы их прироста существенно снижаются, что ведет к снижению производительности одного поезда. При $N_3 = 28$ ед. характер кривой иной и «насыщение» наступает при $N_{лс} = 32$ ед. и также соответствует сменной производительности по горной массе порядка 135 – 139 тыс. т. Это значение можно считать сменной провозной способностью схемы путевого развития.

2. Оптимизация параметров перегрузочных складов при автомобильно-конвейерно-железнодорожном транспорте

Для схем с автомобильно-конвейерно-железнодорожным (а-к-ж.д.) транспортом с внутрикарьерным размещением комплексов перегрузки с конвейерного на железнодорожный транспорт наименее исследованными, а потому представляющим наибольший интерес является определение влияния на производительность системы глубины расположения перегрузочного пункта, вместимости бункеров и складов, а также число поездов. Для проведения многофакторных экспериментов выбраны варианты формирования

транспортной системы Джетыгаринского карьера. Краткая характеристика исследуемых вариантов представлена в табл. 1. Моделирование производилось для следующего комплекса погрузочно-транспортного оборудования: экскаваторов ЭЖГ-8И, автосамосвалов грузоподъемностью 75 т, ленточно-тележечного конвейерного подъемника, тяговых агрегатов ПЭ-2М, думпкаров 2ВС-105, бункерных погрузочных устройств на основе типовых секций с вибропитателями ГПТ. Типы комплексов перегрузки (КП): 2-бункерный корпус погрузки горной массы в думпкары, комбинированный с 2-бункерным корпусом погрузки и экскаваторным складом с двусторонней погрузкой. После расчетов по методу оптимального планирования эксперимента получено уравнение

$$Q_{\text{акж}} = -13,27 + 0,47V_6 + 5,81N_{\text{лс}}^2 - 0,02V_6^2 - 0,27N_{\text{лс}}^2, \quad (1)$$

где $Q_{\text{акж}}$ – производительность а-к-ж.д. транспорта, млн. т / год;

V_6 – вместимость бункера, тыс. т;

$N_{\text{лс}}$ – число локомотивосоставов в работе, ед.

Максимальные темпы прироста производительности при увеличении вместимости бункеров с 0,5 до 9 тыс. т достигаются при $N_{\text{лс}} = 8 - 9$ ед. (14 –16 %). При этих же значениях достигается и максимальная производительность локомотивосостава рабочего парка (около 2,4 млн. т в год). При $N_{\text{лс}} = 10$ ед. темпы прироста значительно ниже (около 11 %). При этом в диапазоне больших значений вместимости бункеров (более 5 тыс. т) соответствующие приращения даже абсолютных значений производительности в вышеуказанном варианте почти в 2 раза выше, чем в варианте с $N_{\text{лс}} = 10$ ед.

Таблица 1

Характеристики вариантов моделируемых схем а-к-ж.д. транспорта

№ п/п	Глубина размещения КП (H_1), м	Число поездов в работе, ед.	Вместимость бункеров, тыс. т	Вместимость склада, тыс. т
1			0,5	
2	0	6	4,75	0
3			9,0	
4	0		0,5	
5		8	4,75	0
6			9,0	
7			0,5	
8	0	10	4,75	0
9			9,0	
10				10
11	0	10	1,0	80
12				150
13				10
14	195	10	1,0	80
15				150
16				10
17	390	10	1,0	80
18				150

Это свидетельствует о том, что дальнейшее увеличение числа поездов в работе при использовании бункерных КП не приводит к соответствующему увеличению производительности системы а-к-ж.д. транспорта. Производительность может быть повышена при использовании комбинированных КП с аккумулялирующими складами за счет снижения длительных (более 2 часов) простоев дробильно-конвейерного комплекса и железнодорожного транспорта. На основе многофакторного эксперимента вида 32 с применением имитационного моделирования получена зависимость производительности системы а-к-ж.д. транспорта от глубины размещения КП и вместимости склада при $V_6=1000$ т. Результаты приведены в табл. 2.

Уравнение в натуральных единицах следующее:

$$Q_{\text{акжд}} = 20,72 + 0,01V_c - 0,003H_2 + 0,00004V_c^2 - 0,000015H_2^2 - 0,000016V_cH_2, \quad (2)$$

где V_c – вместимость склада, тыс. т; H_2 – глубина размещения КП, м.

Таблица 2

Результаты моделирования работы а-к-ж.д. транспорта горной массы Джетыгаринского карьера для построения модели $Q = f(V_c, H_2)$

Номер эксперимента	Уровни факторов		Опытное значение производительности системы, $Q_{\text{акжд}}$, млн. т
	V_c , тыс. т	H_2 , м	
1	10 (-)	0 (-)	20,91
2	150 (+)	0 (-)	22,95
3	10 (-)	390 (+)	17,43
4	150 (+)	390 (+)	18,71
5	80 (0)	195 (0)	20,72
6	150 (0)	195 (0)	21,71
7	10 (-)	195 (0)	19,44
8	80 (0)	390 (+)	18,21
9	80 (0)	0 (-)	22,12

При размещении КП на поверхности увеличение вместимости склада с 10 до 150 тыс. т обеспечивает прирост производительности системы с 20,92 до 22,91 млн. т в год (на 9,5 %). При размещении КП на глубине 195 м прирост производительности составляет, соответственно, с 19,41 до 21,72 млн. т в год (на 11,9 %). На глубине 390 м – с 17,43 до 18,71 млн. т (на 6,8 %), соответственно. Таким образом, существует предел по глубине размещения КП, после которого происходит снижение относительного прироста производительности системы а-к-ж.д. транспорта при увеличении активной вместимости склада.

Задачи, решаемые с применением модели с интерактивным вмешательством в организацию транспортного процесса

3. Определение сменной производительности горно-транспортных систем при различных сочетаниях основного технологического оборудования в конкретных горнотехнических условиях.

Для оперативного планирования показателей работы горно-транспортной системы горнорудного предприятия практический интерес представляют 2 задачи:

– адекватное определение потребного количества поездов для выполнения показателей плана производства;

– установление зависимости от объемов и пропорций перевозимой горной массы при фиксированных расстановке и количестве экскаваторов на погрузке и разгрузке горной массы.

Проведено моделирование работы горно-транспортной системы ОАО «Ураласбест» с применением интерактивно задаваемых алгоритмов функционирования железнодорожного транспорта. Установлена зависимость сменных объемов перевозки по видам горной массы от количества поездов в работе (рис. 3), позволяющая определять необходимое количество локомотивосоставов для различных сменных объемов перевозок по видам горной массы.

Расстановка экскаваторов по плану на май-июнь 2017 г.



Рис. 3 – Зависимость сменных объемов перевозок от количества поездов в работе

Проведено моделирование работы горно-транспортной системы при остановке обогатительной фабрики № 1, когда транспортируются скальная горная масса, пустая порода и пыльные отходы (работает только производство № 2). Получена зависимость сменных объемов перевозок от количества и для различных сочетаний поездов по видам перевозимой горной массы (рис. 4).

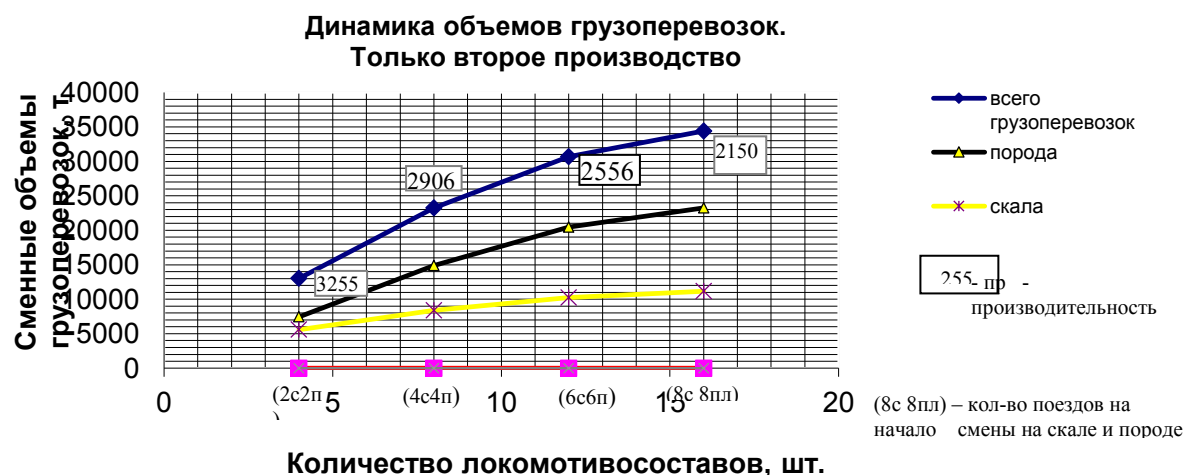


Рис. 4 – Зависимость сменных объемов перевозок от количества и сочетаний (по видам перевозимой горной массы) поездов в работе

На основе имитационной модели работы карьерного транспорта, в которой логика организации движения поездов, варианты принятия решений операторами по станциям задаются интерактивно, установлены зависимости сменных объемов перевозок по видам горной массы от количества поездов в работе для различных вариантов размещения и числа мест погрузки и разгрузки как для свободного, так и для замкнутого циклов орга-

низации работы; как для нормального режима работы, так и при остановке обогатительной фабрики. Обоснована возможность разбиения общего числа поездов на потребные для перевозки отдельно каждого вида горной массы и пыльных отходов. Это позволяет определять сменную производительность горнотранспортных систем при различных сочетаниях основного технологического оборудования в конкретных горнотехнических условиях. В результате тестирования модели установлено, что она позволяет адекватно моделировать движение поездов на участке на основе интерактивно заданных правил организации движения.

Заключение

Для решения задач параметрической адаптации транспортных систем карьеров разработана и реализована при решении ряда актуальных задач универсальная интерактивная имитационная модель функционирования транспортных систем карьеров. Предложенная модель отличается универсальностью. Это позволяет применять ее для всех основных видов карьерного транспорта (автомобильного, железнодорожного, конвейерного) и для их сочетаний в комбинированных схемах (автомобильно-железнодорожного, автомобильно-конвейерно-железнодорожного). Модель может использоваться как для оптимизации параметров транспортных систем карьеров, так и для принятия рациональных решений в соответствии с логикой организации движения транспортных средств.

Литература

1. Яковлев В.Л. Особенности решения транспортных проблем на современном этапе развития горного производства / В.Л. Яковлев, А.Г. Журавлев, Ю.А. Бахтурин // Горное оборудование и электромеханика. - 2017. - № 2. - С. 11 – 18.
2. Яковлев В.Л. Теоретические основы выбора карьерного транспорта рудных карьеров: дис. ... д-ра техн. наук / В.Л. Яковлев; ИГД им. А. А. Скочинского. – М., 1978. – 421 с.
3. Яковлев В.Л. Основные аспекты формирования и новые научные направления исследований транспортных систем карьеров / В.Л. Яковлев, А.Г. Журавлев, Ю.А.Бахтурин // Наука и образование. – 2015. – № 4. – С. 67 – 72.
4. Философские проблемы теории адаптации / ред. Г.И. Царегородцева. – М.: Мысль, 1975. – 277 с.
5. Георгиевский А.Б. Эволюция адаптаций (историко-методологическое исследование) / А.Б. Георгиевский. — Л.: Наука, 1989. — 189 с.
6. Растригин Л.А. Адаптация сложных систем / Л.А. Растригин. – Рига: Зинатне, 1981. – 386 с.
7. Барбашин Д.И. Адаптация средств взаимодействия в сложных технических системах управления / Д.И. Барбашин, А.И. Нистюк // Технические науки – от теории к практике. – 2012. – № 6–1. – С. 85 – 89.
8. Кошкина О.А. Структурная и параметрическая адаптация в развивающейся компьютерной сети управления техническим вузом: дис. ... канд. техн. наук / О.А. Кошкина. – Воронеж, 1998. – 120 с.
9. Methodology and Structure Adaptation Algorithm for Complex Technical Objects Reconfiguration Models / Anton Pashchenko, Pavel Okhtilev, Semen Potrysaev, Yury Ipatov and Boris Sokolov // Cybernetics and Mathematics Application in Intelligent Systems: Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC2017). Vol. 2. Series “Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 574. – P. 319 – 328.
10. Boris Sokolov RFID Technology for Adaptation of Complex Systems Scheduling and Execution Control Models / Boris Sokolov, Karim Benyamna and Oleg Korolev // Proceedings of the 5th Computer Science On-line Conference 2016 (CSOC2016). Vol. 3: Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems / eds. Radek Silhavy, Roman Senkerik, Zuzana Kominkova Oplatkova, Zdenka Prokopova, Petr Silhavy. – Switzerland:

Springer, 2016. – P.433–442. ISSN 2194–5357 ISSN 2194–5365 (electronic). – DOI: 10.1007/978-3-319-33389-2.

11. Models adaptation of complex objects structure dynamics control / B.V. Sokolov, V. A. Zelentsov, O. Brovkina, V. F. Mochalov, S. A. Potryasaev. // Advances in Intelligent Systems and Computing . 4th Computer Science On-line Conference, CSOC 2015; Zlin; Czech Republic; 27 April 2015 through 30 April 2015. Volume 348, 2015, Springer Verlag. P. 21 - 33. - DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-18503-3_3.

12. Капустян Л.А. Теоретические проблемы адаптации социально-экономической системы региона к изменяющимся условиям функционирования / Л.А. Капустян // Известия Алтайского государственного университета. – 2005. - №2 (36). - С. 34 - 37.

13. Доенин В.В. Моделирование транспортных процессов и систем / В.В. Доенин. – М.: Издательство «Спутник», 2012. – 288 с.

14. Доенин В.В. Адаптация транспортных процессов / В.В. Доенин.–М.: Издательство «Спутник», 2009. – 219 с.

15. Соколов Б.В. Методологические и методические основы создания и применения интеллектуальных систем проактивного управления транспортно–логистическими комплексами / Б.В. Соколов, М.Ю. Охтилев // Логистика: современные тенденции развития: Ч. 2: докл. материалов XV Междунар. науч.–практ. конф. 7 – 8 апреля 2016 г. / Отв. ред. В.С. Лукинский. – СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2016. – С. 104 – 107.

16. Козлов П.А. Совместное использование аналитических методов и имитационных моделей / П.А. Козлов, В.С. Колокольников, В.И. Сорокин // Транспорт Урала. – 2016. – № 3 (50). – С. 3 – 8.

17. Козлов П.А. О системах и системности на транспорте / П.А. Козлов // Транспорт Урала. – 2016. – № 2 (49). – С. 3 – 8.

18. Дулин С.К. Разработка системы имитационного моделирования движения железнодорожного транспорта на основе интерактивно задаваемых правил организации движения / С.К. Дулин, А.С. Селецкий, В.И. Уманский // Российская ассоциация искусственного интеллекта [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.raai.org/conference/cai-08/files/cai-08_paper_283.doc.

19. Parametric Adaptation Of Models Describing Structure-Dynamics Control Processes In Complex Technical Systems (CTS) Published / Dmitry A. Ivanov, Boris V. Sokolov, Dmitry N. Verzilin, Evgeniy M. Zaychik.: 9 June 2009 by European Council for Modeling and Simulation in ECMS 2009 Proceedings edited by J. Otamendi, A. Bargiela, J.L. Montes, L.M. Doncel Pedrera . - DOI: 10.7148/2009-0345-0351 Conference: Conference: 23rd European Conference on Modelling and Simulation. This is a document from the site www.scs-europe.net.

20. Козлов П.А. О методах расчета систем железнодорожного транспорта / П.А. Козлов // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 1. – С. 28 – 32.

21. Тимченко В.С. Оценка перспективной пропускной способности участков железнодорожной сети с учетом предоставления «окон», на основе применения имитационного моделирования процессов перевозок / В.С. Тимченко // Молодой ученый. – 2014. – № 2. – С. 199 – 204.

22. Козлов П.А. Макромоделирование железнодорожных станций и узлов / П.А. Козлов, Н.А. Тушин, В.И. Слободянюк // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 2. – С. 82 – 88.

23. Мишарин А.С. Имитационная экспертиза проектов развития транспортной инфраструктуры / А.С. Мишарин, П.А. Козлов // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 4. – С. 52 – 54.

24. Бахтурин Ю.А. Планирование сменной производительности карьерного железнодорожного транспорта на основе имитационного моделирования / Ю.А. Бахтурин // Черная металлургия: Бюл. Ин-та «Черметинформация». – 2018. - № 2. – С. 77 – 84.

25. Имитационное моделирование и автоматизированное управление горно-транспортными работами в карьерах / Р. Г. Салахийев, Ю. А. Бахтурин, А. В. Дедюхин, А. Г. Журавлев // Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 82 – 85.
26. Бахтурин Ю.А. Моделирование работы сложных транспортных систем карьеров / Ю.А. Бахтурин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 1. – С. 82 – 90.
27. Бахтурин Ю.А. Управление режимами движения горной массы на складах при циклично-поточной технологии / Ю.А. Бахтурин // Проблемы недропользования. – 2015. – № 4. – С. 41 – 48. – DOI: 10.18454/2313-1586.2015.04.041.
28. Решетняк С.П. Создание систем циклично-поточной технологии с внутрикарьерными передвижными дробильно-перегрузочными комплексами: дис. ... д-ра техн. наук / С.П. Решетняк; ГоИ КНЦ РАН. – Апатиты, 1997. – 422 с.
29. Бахтурин Ю.А. Имитационное моделирование работы карьерного железнодорожного транспорта комбината "Ураласбест" / Ю.А. Бахтурин // Информационные технологии в реализации экологической стратегии развития горнодобывающей отрасли: Горный информационно-аналитический бюллетень – 2017. – СВ 23. – С. 99 – 107.
30. Бахтурин Ю.А. Актуальные вопросы железнодорожного транспорта карьеров / Ю.А. Бахтурин // Проблемы недропользования. – 2014. – № 3. – С. 145 – 154. – DOI: 10.18454/2313-1586.2014.03.145.
31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 2012617844 Российская Федерация. Транспортная система карьера (ТСК) / Ю.А. Бахтурин, А.Г. Журавлев, Л.А. Трофименко (РФ). – № 2012615505; заявл. 03.07.12; опубл. 30.08.12.