

УДК 622.271.3

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ  
РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ НА КАРЬЕРАХ  
Ч II. РАЗВИТИЕ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНИЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ

Е. В. Фрейдина<sup>1,2</sup>, А. А. Ботвинник<sup>1</sup>, А. С. Коваленко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: alexbtvn@rambler.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет экономики и управления,  
ул. Каменская, 52, 630091 г. Новосибирск, Россия

Изложено обоснование ввода робастного управления техническими ресурсами карьера. Показано, что осуществляемая “стыковка” технологических систем предприятия по равенству средних мощностей горного и транспортного оборудования не обеспечивает его устойчивой работы в процессе эксплуатации. Приведена оптимизационная модель и процедуры моделирования расписания остановок оборудования для ремонтов, при котором достигается устойчивая производительность карьера за счет равномеризации мощности работоспособного экскаваторного и транспортного парков. Дано обоснование предела устойчивости, что придает управляемому объекту робастные свойства и переводит управление на качественно новый уровень.

*Равномеризация мощности оборудования, робастные свойства системы, робастное управление, технологическая система, устойчивость, флуктуация*

Карьер на стадии проектирования конструируется как детерминированная, хорошо организуемая система. Структура производства карьера представляется взаимосвязанными по функциональному признаку технологическими системами, процессы которых составляют производственный цикл добычи полезного ископаемого. Производственный цикл включает буровзрывную подготовку массива пород и полезного ископаемого к выемке, экскавацию и погрузку горной массы в транспортные средства, размещение вскрышных пород в отвалах (отвалообразование), полезного ископаемого в аккумулялирующих емкостях для подготовки к переработке на обогатительной фабрике или дробильно-сортировочном комплексе. Функционирование технологических систем осуществляется посредством взаимосвязанности составляющих их процессов. Сложность их структуры определяется большим количеством оборудования и транспортных средств с многообразными конструктивными и функциональными связями между собой при дискретном перемещении их в пространстве.

На стадии проектирования добывающего предприятия работоспособность производственной системы обеспечивается созданием *тривиального равновесного состояния* [1], которое устанавливается на основе равенства средних величин различных управляемых параметров по отдельным взаимодействующим технологическим системам. Для исследуемого предприятия это, преж-

де всего, “стыковка” по эксплуатационной производительности трех технологических систем: экскавация и погрузка, перевозка и складирование горной массы, работающих в синхронном режиме и обеспечивающих производственный цикл.

Сложность такой “стыковки” при эксплуатации объясняется тем, что горное оборудование и транспортные средства загружены неравномерно во времени в связи с периодическими остановками на планово-предупредительные ремонты (ППР) и случайными отказами. В результате в единицу времени (час, смену, сутки) производительность техники может колебаться от нормативной (максимально возможной в определенных горнотехнических условиях) до равной нулю, когда техника находится в неработоспособном состоянии по причине планового ремонта или отказа. В этой связи, чтобы обеспечить устойчивое функционирование производственной системы, потребуется на уровне планирования производственных мощностей разработать расписание остановок техники на ППР, при котором создается устойчивый потенциал ее мощности в посуточном цикле.

Дополнительные импульсы для флуктуации производительности горного и транспортного оборудования создает взаимодействие его со средой:

— геологической, характеристики которой (физические свойства массива или разрушенной породы) являются неоднородными и изменчивыми;

— природной, оказывающей влияние на устойчивую работу посредством неблагоприятных климатических условий.

Под устойчивостью функционирования организуемой системы понимается свойство, образуемое посредством введения предела флуктуации параметра функционирования системы относительно ее равновесного состояния. Введение границ, в рамках которых функционирование системы рассматривается как устойчивое, означает переход к робастному управлению и принятие его приемов и процедур воздействия на объект управления [2].

#### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАВНОМЕРИЗАЦИИ МОЩНОСТИ РАБОТОСПОСОБНОГО ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Каждая выделенная технологическая система содержит определенный потенциал производственной мощности, реализация которого полностью зависит от технических возможностей взаимодействующих с ней систем. Таким образом, вскрышные и добычные работы составляют полностью интегрированную систему взаимосвязанных процессов: выемочно-погрузочных, транспортных, отвальных и процессов углеподготовки. Отношение между потенциалами мощности технологических систем, составляющим производственный цикл, представим в виде следующих неравенств.

Производственный цикл обработки вскрышных пород:

$$Q_{вб} \geq Q_{вэк} \geq Q_{втр} \leq Q_{от}, \quad (1)$$

производственный цикл обработки полезного ископаемого:

$$Q_{дб} \geq Q_{дэк} \geq Q_{дтр} \leq Q_{ск}, \quad (2)$$

где  $Q_{вб}$ ,  $Q_{дб}$  — производительность техники по подготовке вскрышных пород и полезного ископаемого к дроблению взрывом соответственно;  $Q_{вэк}$ ,  $Q_{дэк}$  — производительность системы по экскавации и погрузке при перевозке вскрышных пород и полезного ископаемого соответственно;  $Q_{втр}$ ,  $Q_{дтр}$  — производительность транспортной системы при перевозке вскрышных пород и полезного ископаемого соответственно;  $Q_{от}$  — производительность отвальной системы;  $Q_{ск}$  — приемная емкость аккумулирующих емкостей.

Соотношение вида  $Q_{вб} \geq Q_{взк}$  и  $Q_{дб} \geq Q_{дзк}$  объясняется тем, что буровзрывная подсистема должна быть способна периодически создавать запас пробуренной и взорванной массы в размере месячного и более объема добычи полезного ископаемого или отработки вскрышных пород. В свою очередь потенциальная производительность забойной подсистемы  $Q_{зк}$  должна превышать потенциальную производительность транспортной системы, как представлено в (1) и (2), в связи с необходимостью выполнения погрузочной техникой вспомогательных работ — это перевалка горной массы, зачистка забоя и др. Аналогичная зависимость присуща и связи между технологическими системами транспортной и отвалообразованием.

Постановка и сложность задачи оптимизации взаимодействия технологических систем вызвана тем, что функционирование техники — это последовательный дискретный переход из состояния работы в состояние простоя и возврат, после восстановления, в работоспособное состояние и, как следствие, неравномерная “отдача” мощности системы по элементарным временным интервалам: часам, сменам, суткам.

Представим роль технологических систем в производственном цикле: экскавация и погрузка — “производитель”, транспортная и отвальные системы — “обслуживание”. Последовательностью выполнения процессов технологии каждой из систем обусловлено влияние состояния систем обслуживания на работу системы “производителя”. Особенности взаимодействия технологических систем (ТС) — экскавация и погрузка, транспорт и отвалообразование — наглядно показаны имитационным моделированием их функционирования при балансе между введенными мощностями техники.

На рисунке приведен фрагмент временной диаграммы функционирования забойных экскаваторов, транспортных средств, экскаваторов на отвальных работах в виде двух чередующихся временных рядов: интервалов времени работы  $t$  и времени восстановления  $\tau$  при проведении ППР.

В вычислительном эксперименте характеристики функционирования системы устанавливаются в момент совершения события — очередного изменения состояния одного из элементов. Каждое событие формирует набор элементов, который может обеспечить определенную производительность системы. Продолжительность некоторого фиксированного работоспособного состояния системы  $\theta_e$ , наступающего в результате очередного события ( $e$ ), определяется

$$\theta_e = \min\{t_i \text{ (или } \tau_i), t_j \text{ (или } \tau_j), t_k \text{ (или } \tau_k)\}, \quad (3)$$

где  $i, j, k$  — индекс последовательно взаимосвязанных технологических систем.

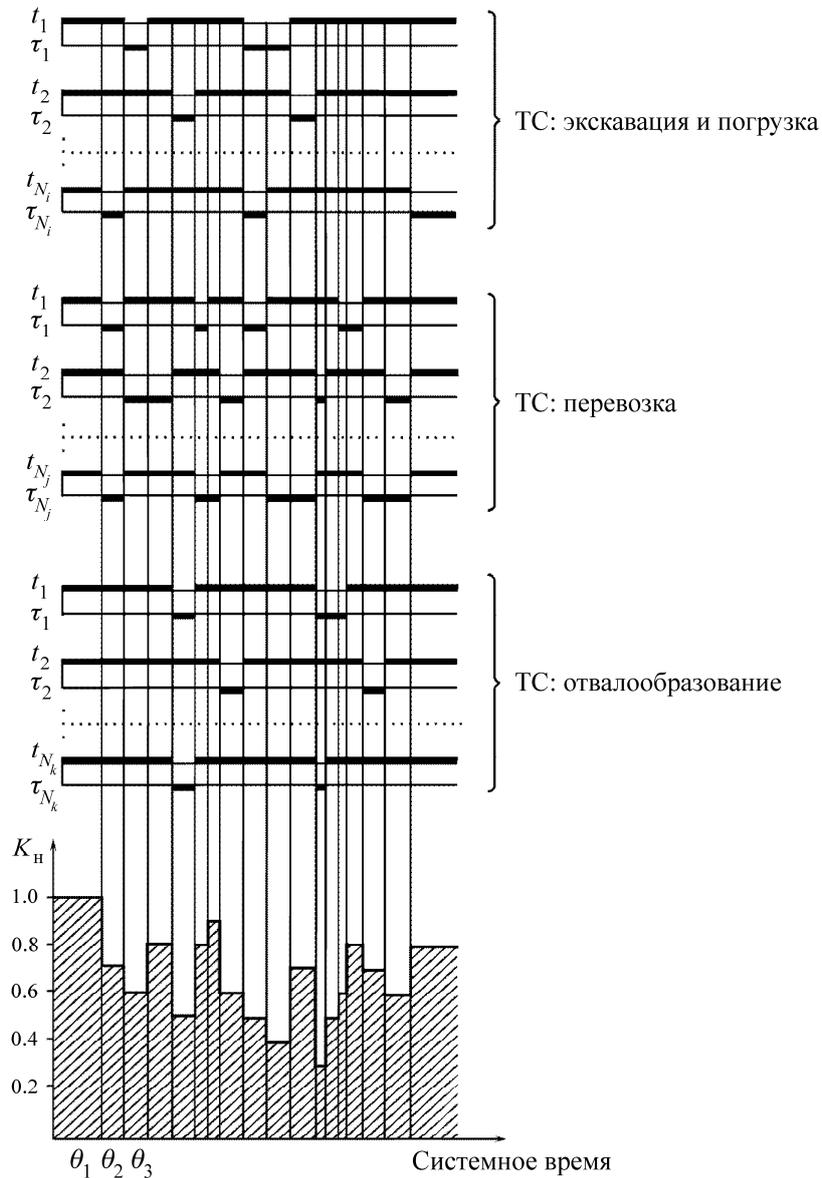
Объем выполненных работ системой “производитель” в единицу времени  $Q_{\theta_e}$  обусловлен суммарной производительностью работоспособных экскаваторов в период состояния  $e$  продолжительностью  $\theta_e$ :

$$Q_{\theta_e} = \sum_{k=1}^{k=N_{\theta_e}} Q_{kt,e}. \quad (4)$$

Потенциальная мощность производственной системы в состоянии  $e$  в единицу времени определяется производительностью забойных экскаваторов. Коэффициент, характеризующий вероятность реализации введенных в систему мощностей оборудования для каждого состояния  $e$  продолжительностью  $\theta_e$ , вычисляется по формуле

$$K_{\theta_e} = \frac{Q_{\theta_e}}{Q_w}, \quad (5)$$

где  $Q_w$  — потенциальная суммарная эксплуатационная производительность работоспособного комплекса экскаваторов системы “производителя”.



Фрагмент временной диаграммы функционирования горного оборудования и транспортных средств:  $N_i$  — количество погрузочного оборудования;  $N_j$  — количество транспортного оборудования;  $N_k$  — количество оборудования на отвале

Средневзвешенное значение коэффициента реализации вводимых в систему мощностей в периоды состояния  $e$ :

$$K_n = \frac{\sum_e^L K_{\theta_e} \theta_e}{\sum_e^L \theta_e} \tag{6}$$

Обратимся к временной диаграмме коэффициента реализации введенных в систему мощностей техники (см. рисунок). Приведенными данными подтверждается как высокая флуктуация реализации потенциальной производительности экскаваторного парка, так и неравномерность ее динамики. Обработка полученных данных по изменению подготовленных к работе

мощностей погрузочного оборудования по периодам  $\theta_e$ , реализуемых благодаря работоспособному состоянию транспортных средств и отвального оборудования, показала, что коэффициент вариации составляет примерно 25 %, и эта величина характеризует неустойчивую работу интегрированной производственной системы. Для снижения флуктуации введенных в систему мощностей горного оборудования в качестве первого и основного управляющего воздействия следует рассматривать изменения в построении расписания остановок экскаваторов и транспортных средств на планово-предупредительные ремонты.

### КРИТЕРИИ И МОДЕЛЬ РАВНОМЕРИЗАЦИИ МОЩНОСТИ РАБОТОСПОСОБНОГО ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Обеспечение равномеризации мощности работоспособного горного оборудования и транспортных средств возложено на управление остановками на планово-предупредительные ремонты. Цель равномеризации состоит в том, чтобы минимизировать отклонение от средней производительности вводимых в работу мощностей оборудования [3]. Для задачи в такой постановке необходимо обосновать подход к определению предела допустимых колебаний исследуемого параметра. Идеальный вариант — когда только за счет разнонаправленных колебаний удается выйти на запланированное значение. В этом случае предел допустимого изменения производительности комплекса работоспособных забойных экскаваторов ( $Q_t$ ) относительно средней потенциальной производительности системы ( $Q_{st}$ ) определится как

$$\bar{Q}_{st} - \sigma_Q \leq Q_t \leq \bar{Q}_{st} + \sigma_Q, \quad (7)$$

где  $\sigma_Q$  — среднеквадратичное отклонение расчетной суммарной производительности системы.

Такой подход следует рассматривать как приоритетный, если отношение среднеквадратичного отклонения к плановой производительности интегрированной системы в период  $t$  ( $Q_{pt}$ ) не превышает величину, характеризующую устойчивое функционирование системы или процесса. Это означает, что коэффициент вариации измеряемого параметра не должен превышать 10–15 %. Формализуем это условие с предельным значением:

$$\sigma_Q = 0.15 Q_{pt}. \quad (8)$$

Задание предела, равного величине  $\sigma_Q$ , определяемой (8), позволяет около 68 % значений производительности внести в устойчивую зону. При величине предела  $2\sigma_Q$ , в которой коэффициент вариации измеряемого параметра допускается 25–30 %, в зону умеренной устойчивости входит 95 % значений производительности. Считаем, что предел, отстроенный по выражению (8), является основным для регулирования отклонениями, а предел величиной  $2\sigma_Q$  — дополнительным. Дифференцирование отклонений мощности работоспособного оборудования по величине допустимого предела определяет структуру паттерна робастного управления действующим парком оборудования [4].

Учитывая, что в работе находятся экскаваторы различной производительности, необходимо стремиться к тому, чтобы ресурсы в системе, определенные через эксплуатационную производительность экскаватора  $k$  в период  $j$  —  $Q_{kj}$ , были равномерно распределены по периодам.

Задача равномеризации решается в определенной последовательности, вызванной большой размерностью парков используемой техники. Первоначально находится решение поставленной задачи для парка забойного погрузочного оборудования с флуктуацией суммарной мощности в допустимом пределе. Результат ее решения является исходным для обеспечивающих техноло-

гических подсистем: транспортной и отвалообразования. Расстановка транспортных средств и отвального оборудования на ремонты должна быть такова, чтобы реализуемая ими суммарная мощность соответствовала динамике распределения мощности экскаваторного парка во вскрышной и добычной зонах.

В качестве исходной информации для математической модели оптимизации стабильного обеспечения карьера мощностью работоспособного оборудования составляется список экскаваторов  $k$ , которые периодически выводятся для ремонта вида  $r$  — ремонтный осмотр (РО), текущий ( $T_1$  и  $T_2$ ), средний (С) и капитальный (К). Каждый вид ремонта характеризуется двумя параметрами: нормативной продолжительностью ремонта  $\tau_i$  и периодом его работоспособного состояния  $t_i$ . Задача в такой постановке относится к задачам теории расписания [5] и усложнена тем, что в системе находятся в работе различные по производительности экскаваторы.

Формализация задачи равномеризации мощности экскаваторного парка путем управления расписанием ППР представляется целочисленной моделью следующего вида.

Целевая функция, реализующая равномерность использования мощностей по элементарным (суточным) периодам  $J, j = 1, 2, \dots, T$ :

$$\max_{j \in T} \sum_k Q_{kj} (1 - \delta_{kj} - \gamma_{kj} - \lambda_{kj}) \rightarrow \min. \tag{9}$$

Переменные  $\delta_{kj}, \gamma_{kj}, \lambda_{kj}$  равны 0, если в период  $j$  экскаватор  $k$  находится в плановом ремонте вида РО, или  $T_1$ , или  $T_2$  соответственно, или 1, когда экскаватор находится в работе. Искомыми переменными являются  $j_\delta, j_\gamma, j_\lambda$  — период начала ремонтов каждого вида.

В задачу включены следующие ограничения:

1) ограничение продолжительности ремонта каждого вида ( $\tau^\delta, \tau^\gamma, \tau^\lambda$ ):

$$\sum_j \delta_{kj} = \tau_k^\delta, \quad \sum_j \gamma_{kj} = \tau_k^\gamma, \quad \sum_j \lambda_{kj} = \tau_k^\lambda, \tag{10}$$

где  $\tau_k^\delta, \tau_k^\gamma, \tau_k^\lambda$  — продолжительность ремонтного осмотра, текущего и среднего ремонтов соответственно для  $k$ -го экскаватора;

2) непрерывность каждого вида ремонта формализуется как

$$\sum_{j=j_\delta}^{j_\delta+\tau_k^\delta} \delta_{kj} = \tau_k^\delta, \quad \sum_{j=j_\gamma}^{j_\gamma+\tau_k^\gamma} \delta_{kj} = \tau_k^\gamma, \quad \sum_{j=j_\lambda}^{j_\lambda+\tau_k^\lambda} \delta_{kj} = \tau_k^\lambda; \tag{11}$$

3) для экскаватора  $k$  в каждом периоде выполняется только один вид ремонта:

$$\delta_{kj} + \gamma_{kj} + \lambda_{kj} \leq 1. \tag{12}$$

В силу последнего ограничения в (12) введен множитель  $\Theta = 1 - \delta_{kj} - \gamma_{kj} - \lambda_{kj}$  — число, равное 1, если экскаватор находится в работе, и 0 — в случае ремонта какого-либо вида;

4) ремонты каждого вида назначаются через определенное техническими регламентами время:

$$j_\delta + R_1 - \Delta \leq j_\lambda \leq j_\delta + R_1 + \Delta, \quad j_\lambda + R_2 - \Delta \leq j_\gamma \leq j_\lambda + R_2 + \Delta, \tag{13}$$

где  $R_1$  — время по регламенту проведения ремонта вида  $T_1$  после РО;  $R_2$  — время по регламенту проведения ремонта вида  $T_2$  после  $T_1$ ;  $\Delta$  — разрешенный ремонтной службой временной лаг наступления ремонта (допустимое время промедления или опережения при проведении ремонта).

Возможности ремонтной службы позволяют в каждый период  $j$  вывести в ремонт одновременно не более  $N_j$  экскаваторов:

$$\sum_k \delta_{kj} + \gamma_{kj} + \lambda_{kj} \leq N_j. \quad (14)$$

Модель (9)–(14) достаточно полно формализует исходные условия и правила управления остановками экскаваторов на ППР с целью равномеризации суммарной мощности работоспособного оборудования. Методы решений таких задач введены в [5] и на современном уровне описаны в [6].

#### ПРОЦЕДУРЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАДАЧИ

Практика реализации модели (9)–(14) показала, что для доведения расчетного план-графика до практического применения потребуется его корректировка с участием специалистов как по ремонтным работам, так и по управлению горными работами. Дополнительно к этой модели разработаны процедуры автоматизированной интерактивной коррекции план-графика ППР. Корректирование включает интерактивный поиск возможности сглаживания размаха отклонений от средней мощности по парку. Разработана процедура возврата к предыдущему решению, если в период  $j$  получены результаты, превышающие пределы допустимого отклонения суммарной производительности действующих экскаваторов, т. е. не выполняются ограничения (8). Управляющим параметром изменения решения является перенос даты начала ремонта на более поздний или ранний период, который определяется состоянием и загрузкой техники.

Представим алгоритм для формирования плана обеспечения производственного цикла равномерным распределением мощности работоспособного оборудования, который включает следующие процедуры, осуществляемые в автоматизированном режиме.

1. Построение на основе модели (9)–(14) и нормативных данных по объемам наработки и продолжительности ремонтных периодов расписания (план-графика) остановок на ремонт и окончания ремонтов по каждой единице экскаваторного парка забойной зоны карьера (подсистема “производитель”). Определение реализуемой мощности экскаваторного парка отдельно на добыче и на вскрышных работах, количества рабочих и ремонтных дней по временным периодам: месяц, квартал, год.

2. Определение предела допустимой флуктуации производительности работоспособного оборудования по системе “производитель”. В качестве предела флуктуации принимается, прежде всего, условие (8) по вводу управляемого параметра в зону устойчивого обеспечения функционирования системы с пределом отклонений суммарной производительности  $0.15 Q_{pt}$ , а в случае превышения этой границы рассматривается ее увеличение до  $0.30 Q_{pt}$  при условии, что удастся сбалансировать работу взаимосвязанных технологических систем.

3. В интерактивном режиме с помощью процедуры “Корректирование” в технологической системе “производитель” на рассчитанном графике ППР проводится встраивание посуточной суммарной производительности введенных в работу экскаваторов заданных пределов допустимого отклонения путем сдвига начала ремонта в заданном временном диапазоне.

4. Из план-графика ППР экскаваторного парка, по которому достигнуто устойчивое распределение его мощности, выводятся локальные планы-графики ППР транспортных средств, оборудования на отвальных и других видах горных работ. В интерактивном режиме осуществляется синхронизация динамики мощности техники системы производителя и взаимосвязанных с ним обслуживающих систем — транспорт и отвалообразование или складирование.

5. Так как в оптимизационную модель введено ограничение (14) на допустимую загрузку ремонтной службы, то проводится анализ и на равномеризацию трудоемкости ремонтных работ.

#### 6. Формирование выходных документов.

Результатом решения поставленной задачи является достижение сбалансированной работы: технологических подсистем по мощности работоспособных единиц оборудования, производственной и ремонтно-восстановительной систем.

В итоге, после разработки и оптимизации план-графиков ремонтов с позиции равномеризации мощности работоспособного оборудования на заданный год, по всем участкам карьера, видам работ и типам оборудования, формируются итоговые документы:

1. План распределения во времени (год, месяц с распределением по суткам) и по участкам мощности работоспособного оборудования: экскаваторов на добыче, вскрыше и отвалах, транспортных средств.

2. График планово-предупредительных ремонтов горного оборудования, разработанный на год с распределением по месяцам и суткам в пределах месяца.

3. График планово-предупредительных ремонтов транспортных средств по месяцам и суткам в пределах месяца года.

4. Продолжительность и трудоемкость ремонтных работ по видам оборудования на год, с распределением по месяцам и суткам в пределах месяца.

#### ВЫВОДЫ

Проектирование работы комплексов оборудования карьера без раскрытия дискретности его работы во времени и увязки режима работы экскаваторов забойной зоны, транспортных средств и экскаваторов на отвалах вносит в производственную систему “наследственную неустойчивость” работы.

Характер флуктуации и возможности равномеризации производительности карьера при заданных комплексах погрузочного оборудования и транспортных средств вскрываются при автоматизированном построении графиков планово-предупредительных ремонтов и оптимизационными процедурами с применением специальной математической модели.

Заключение об устойчивости функционирования карьера определяется вводом предела допустимого отклонения потенциальной производительности карьера по элементарным периодам времени (суткам), выявление которого представляет технико-экономическую задачу в приложении к конкретным технологическим системам ведения горных работ.

Установление предела допустимого отклонения означает введение робастного управления на действующем предприятии, которое обеспечивается автоматизированным планированием и управлением горных работ и работ по восстановлению горной и транспортной техники.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Могилевский В. Д. Методология систем. — М.: Экономика, 1999.
2. Фрейдина Е. В., Ботвинник А. А., Дворникова А. Н. Методологические основы и инструментарий для развития робастного управления горными работами на карьерах. Ч. I. Система принятия решений в контексте управления качеством добываемого полезного ископаемого // ФТПРПИ. — 2014. — № 2.
3. Фрейдина Е. В., Третьяков А. С., Молотилев С. Г. Методы и модели текущего планирования на карьерах. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1989.
4. Певзнер Л. Д. Теория систем управления. — М.: Изд-во МГУ, 2002.
5. Вагнер Г. Основы исследования операций. Т. 2. — М.: Мир, 1973.
6. Лазарев А. А., Гафаров Е. Р. Теория расписаний. — М.: Изд-во МГУ, 2011.

*Поступила в редакцию 22/V 2014*