

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

2007, том 43, № 6

**СИСТЕМЫ ДЛЯ НАУЧНЫХ
И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ**

УДК 621.865.8 : 622

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫМИ РОБОТАМИ*

В. Л. Конюх

*Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: vkonyukh@mail.ru*

Предлагаются методы оценки подготовленности технологий подземных работ к применению робототехники и целесообразности роботизации горных работ.

Введение. Горное дело признано главной областью применения робототехники после машиностроения [1]. Переход к добыче полезных ископаемых глубже километра делает работу людей под землей невозможной из-за высокой температуры. С каждым годом возрастают расходы на обеспечение безопасности, обучение, страхование, вентиляцию, компенсацию простоев, перемещение шахтеров под землей. В начале 1990-х годов эксперты полагали, что можно будет заменить горнорабочих роботами из машиностроения. Время показало, что в горном деле не может быть применен опыт разработки робототехнических систем для мелкосерийного производства. В отличие от роботов в машиностроении подземный робот будет работать с большими нагрузками в изменяющейся среде и ограниченном пространстве выработки. Возникают задачи оценки подготовленности технологий горных работ к роботизации, управления в изменяющейся среде, навигации при движении в выработке, определения положения робота в подземном пространстве, представления информации об условиях и результатах работы.

В 1967 году на шахте «Генерал Блюменталь» в Германии была впервые применена система вождения поездов без машинистов. Бурильные установки с перепрограммируемым позиционированием бурильной головки, позволившие вдвое сократить время наведения на точки бурения, создавались во Франции, Японии и Норвегии. В 1980-е годы стали разрабатывать системы дистанционного управления погрузочно-транспортными машинами для погрузки руды в опасных местах. Национальные программы роботизации гор-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 94-01-00042 «Теория шахтных роботов») и Научного комитета НАТО (грант CRG OUTR № 960628 «Имитация и анимация процессов добычи угля в России»).

ных работ формировались в Великобритании (NGB), Канаде (CCARM), Франции (RAM), Австралии и СССР. Одновременно разрабатывались дистанционно управляемые манипуляторы для выполнения вспомогательных операций. Удаленному из рабочей зоны оператору было трудно воспринимать усилия в звеньях манипулятора и получать визуальную информацию о зоне обслуживания в ограниченном пространстве выработки. Крупным достижением стало управление погрузочно-транспортными машинами с поверхности, испытанное в 1994 г. на канадском руднике “Cooper Cliff North Mine” [2].

Различия роботов для машиностроения и подземных работ, поясняющие невозможность переноса роботов из машиностроения в горное дело, представлены в таблице.

Целью данной работы является определение задач управления роботами в подземной среде.

| Свойства | Производство | Горное дело |
|--|---|--|
| Цель применения | Автоматизация гибкого производства | Повышение безопасности работ |
| Основная функция | Выполнение изменяющейся задачи в фиксированной среде | Выполнение фиксированной задачи в изменяющейся среде |
| Рабочее место | Фиксированное | Изменяющееся |
| Связь с оборудованием | Жесткая | Гибкая |
| Рабочая зона | Измерения и обзорность не ограничены | Измерения и обзорность ограничены выработкой |
| Объект манипулирования | Размещение и характеристики не меняются | Размещение и характеристики меняются |
| Контроль действий | Непосредственный и полный | Косвенный и неполный |
| Перепрограммирование | Выполняется в течение неограниченного времени с помощью специальных средств | Выполняется в течение ограниченного времени на рабочем месте |
| Перемещение оборудования с целью роботизации | Возможно | Невозможно |
| Изменение технологии | Невозможно | Возможно |
| Участие человека в рабочем цикле | Невозможно | Возможно |
| Механическая база робота | Создается специально | Горная машина |
| Защита от среды | Не требуется | Требуется |
| Технические средства | Имеются | Отсутствуют |
| Приводы | Пневматический, гидравлический, электрический | Гидравлический, электрический (взрывобезопасный) |

1. Система «горнорабочий – машина – среда». Под термином «подземный робот» одни понимают манипулятор, который должен воспроизводить движения горнорабочего, а другие – горную машину с перепрограммируемым управлением. Будем считать подземным роботом мобильную горную машину с отработанной механической базой и гибким управлением многофункциональным рабочим органом. Возможны три формы роботизации подземных работ [3]:

- 1) ввод дистанционно управляемых манипуляторов для механизации ручных работ в существующих технологиях;
- 2) создание технологических роботов на базе горных машин с адаптивным управлением;
- 3) применение инспекционных роботов для получения информации из недоступных мест.

Для подземных работ наиболее перспективна вторая форма, способная стать основой для безлюдной добычи полезных ископаемых на больших глубинах.

Представим технологию горных работ в виде системы «человек (Z_1) – машина (Z_2) – среда (Z_3)» (рис. 1).

С позиции управления подсистемы обладают разными свойствами. Для среды это множество S_1 состояний технологической среды, влияющих на управление. Для машины это множество S_2 внутренних состояний агрегата, влияющих на управление, множество W передаточных функций приводов, множество R команд управления и множество M технологических функций. Для человека это множество $S_3 \subseteq (S_1 \cup S_2)$ состояний среды и машины, распознаваемых человеком, и множество L алгоритмов управления машиной. Функционирование системы описывается выражением

$$g : (S_1 \cup S_2) \rightarrow R \quad \text{для } \exists : l \in L, \forall : m \in M, \forall : w \in W.$$

Определим подмножества функций взаимодействия подсистем при случайных изменениях среды:

- U_{31} (среда – человек) – изменение алгоритма управления машиной при изменении среды (f_1); изменение числа технологических ситуаций, распознаваемых человеком, при изменении среды (f_2);
- U_{32} (среда – машина) – изменение технологических функций машины в зависимости от условий работы (f_3); изменение передаточных функций приводов при изменении рабочих нагрузок (f_4);
- U_{21} (машина – человек) – изменение числа состояний машины, распознаваемых человеком (f_5);
- U_{12} (человек – машина) – переключение алгоритмов управления машиной в зависимости от состояний среды и машины (f_6).

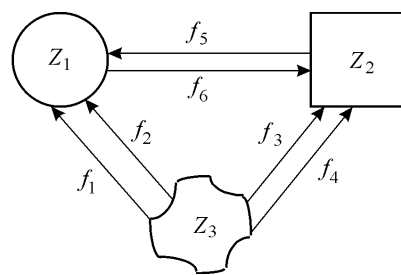


Рис. 1

Взаимовлияние подсистем можно оценить коэффициентами: сложности управления в изменяющейся среде (f_1), обзорности рабочей зоны машины при дистанционном управлении (f_2), функциональной полноты оборудования (f_3), стабильности коэффициентов передачи и постоянных времени приводов (f_4), полноты представления состояний ма-

шины (f_5), устойчивости алгоритма управления (f_6). Экспериментальное определение коэффициентов позволит сопоставлять степени изменчивости среды, сравнивать степени подготовленности горных работ к роботизации, задавать уровень адаптивности системы управления и распределять функции между оператором и роботом.

2. Влияние изменяющейся среды на управление. Подземным роботам предстоит работать в изменяющейся среде, зависящей от гипсометрии пласта, свойств горных пород, высоты выработки, положения рабочего места в выработке, препятствий на пути движения робота, условий бурения и крепления. Проявления горного давления приводят к выбросам угля и газа, изменению сечения выработки. Случайные изменения этих факторов невозможно предусмотреть в алгоритме управления роботом. Некоторые из них, например температура и скорость воздуха, могут не влиять на процесс управления роботом. Возникает задача оценки изменчивости технологической среды по признакам ее состояний, влияющим на управление. Известны методы оценки сложности управления путем подсчета числа переключений органов управления за рабочий цикл, исполнительных устройств объекта при заданном объеме логических операций, элементарных операций в единицу времени, строк таблицы переходов, членов логической схемы алгоритма, логических условий, входов и выходов, а также оценки связности вершин граф-схемы алгоритма [4]. Они не учитывают вероятностный характер управления в неорганизованной среде и не позволяют сравнивать процессы управления между собой. В [5] предлагается оценивать сложность управления по изменению алгоритма управления при повторении рабочих циклов.

Представим модель управления в виде ориентированного мультиграфа, содержащего начальную вершину A_0 , конечную вершину A_q , вершины с выбором решения $B_1, \dots, B_j, \dots, B_m$ и промежуточные вершины $A_1, \dots, A_k, \dots, A_{q-1}$ (рис. 2). Вершины с выбором решения соединены с промежуточными вершинами несколькими дугами, вероятность выбора которых зависит от текущего состояния среды S .

В k -й промежуточной вершине происходит переключение некоторого исполнительного устройства за постоянное время τ_k . В j -й вершине $B_1, \dots, B_j, \dots, B_m$ выбирается одно из h решений $R_{j\gamma}$ с вероятностью

$$P_{j\gamma} = \frac{P(R_{j\gamma} \cap S_i)}{P(S_i)} \left(\gamma = 2, \dots, h, \sum_{\gamma=2}^h P_{j\gamma} = 1 \right),$$

зависящей от вероятности $P(S_i)$ изменения среды в i -м рабочем цикле и условной вероятности $P(R_{j\gamma} \cap S_i)$ принятия решения γ при состоянии среды S_i . Реализация алгоритма в i -м рабочем цикле представляет собой последовательность дуг от начальной вершины к конечной через m_i узловых вершин, имеет длину l_i и осуществляется с вероятностью

$$P_i = \prod_{j=1}^{m_i} P_{j\gamma}.$$

Сложность управления можно оценить степенью разнообразия реализаций алгоритма управления при изменениях технологической среды в n повторяющихся рабочих циклах. Повышение размерности

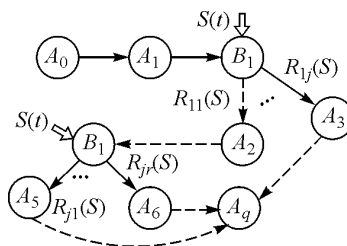


Рис. 2

среды, ее изменчивости и влияния на процесс управления приводят к росту числа узловых вершин, перераспределению вероятностей P_{ij} и увеличению разброса длин реализаций относительно математического ожидания $\bar{l} = \sum_{i=1}^n l_i P_i(l)$. В алгоритмическом смысле длину l_i характеризует число вер-

шин в i -й реализации, а в технологическом – время i -го цикла $t_i = \sum_{k=1}^{q_i} \tau_k$ или

число q_i переключений исполнительных устройств за цикл. Выбор критерия сложности в виде выборочной дисперсии $D_n(t)$, коэффициента вариации $\delta = \sqrt{D_n(t)}/\bar{l}$ длины реализации или отношения числа вариантов длины реализации к числу элементов выборки не позволит сравнивать между собой процессы с разной длиной реализации, а также процессы с разным объемом выборки. Чем больше среда влияет на управление, тем чаще меняются вероятности P_{ij} и длина пути на графе относительно средней длины $\bar{l} = \sum_{i=1}^n l_i P_i(l)$. Таким образом, сложность управления можно оценить диспер-

сией $D(l)$ длины реализации от A_0 до A_q , которая отыскивается путем хронометража n рабочих циклов.

Пусть выборка времени t_1, t_2, \dots, t_n для n рабочих циклов имеет дисперсию $D_n(t)$. Выборка содержит $m \leq n$ неповторяющихся элементов $t_i, \dots, t_{i+j}, \dots, t_m$ с дисперсией $D_m(t)$.

Очевидно, что для среды, влияющей на управление в каждом рабочем цикле, $m = n$, $t = \text{var}$, $D_n(t) = D_m(t)$ и чем больше элементов в выборке, тем сложнее управление.

Тогда критерий сложности управления может быть представлен как

$$K_c = D_n(t)/D_m(t).$$

Докажем свойства критерия. Для любой выборки $0 \leq K_c \leq 1$. Дисперсия некоторой выборки

$$D_n(t) = \frac{(t_1 - \bar{t}_n)^2 n_1 + (t_2 - \bar{t}_n)^2 n_2 + \dots + (t_m - \bar{t}_n)^2 n_m}{n_1 + n_2 + \dots + n_m - 1}.$$

Дисперсия неповторяющихся элементов этой выборки

$$D_m(t) = \frac{(t_1 - \bar{t}_m)^2 n_1 + (t_2 - \bar{t}_m)^2 n_2 + \dots + (t_m - \bar{t}_m)^2 n_m}{m - 1}.$$

Используем свойство минимальности дисперсии, заменив \bar{t}_n значением \bar{t}_m :

$$D_n(t) < \frac{(t_1 - \bar{t}_m)^2 n_1 + (t_2 - \bar{t}_m)^2 n_2 + \dots + (t_m - \bar{t}_m)^2 n_m}{n_1 + n_2 + \dots + n_m - 1}.$$

Если $n_i = 1$ ($i = 1, \dots, n$), то правая часть неравенства представляет собой $D_m(t)$, поэтому $D_n(t) < D_m(t)$. Для самого сложного управления $\bar{t}_n = \bar{t}_m$ и $D_n(t) = D_m(t)$. Следовательно, $0 \leq K_c \leq 1$.

Фиксированная последовательность операций в начале или конце процесса управления не меняет его сложности.

Заменяем A_1 (см. рис. 2) последовательностью вершин, описывающих последовательность операций с постоянным временем выполнения T . Тогда для выборки $(t_1 + T), (t_2 + T), \dots, (t_n + T)$

$$K_c = \frac{D_n(t+T)}{D_m(t+T)} = \frac{D_n(t)}{D_m(t)}.$$

Оценка сложности управления не зависит от единиц измерения.

Увеличив все составляющие l_i выборки в z раз, получаем

$$K_c = \frac{D_n(rt)}{D_m(rt)} = \frac{r^2 D_n(t)}{r^2 D_m(t)} = \frac{D_n(t)}{D_m(t)}.$$

Способ оценки сложности управления по хронометражным данным сравнивался с четырьмя способами оценки сложности управления по формализованным описаниям алгоритмов зачерпывания руды и движения вдоль выработки ковшовой погрузочно-транспортной машины ПД-8М на руднике «Миргалимсай» (Республика Казахстан). Описание алгоритма зачерпывания содержит 20 операторов, 3 микропрограммы и 15 логических условий [6]. Результаты сравнения показали, что расхождение оценок не превышает 15 %. Это позволило экспериментально оценить сложность управления 23 видами горных работ с целью выбора и подготовки их к роботизации [7].

3. Перемещение в ограниченном пространстве. 3.1. *Обзорность рабочей зоны.* Манипулятор 1 длиной r оснащен захватным устройством 2 с межпальцевым расстоянием d и поворачивается на корпусе 3 подземного робота в плоскости, параллельной почве выработки (рис. 3).

Технологические операции сводятся к наведению захватного устройства 2 на объект манипулирования. Для неподвижных точек наблюдения A_1, A_2

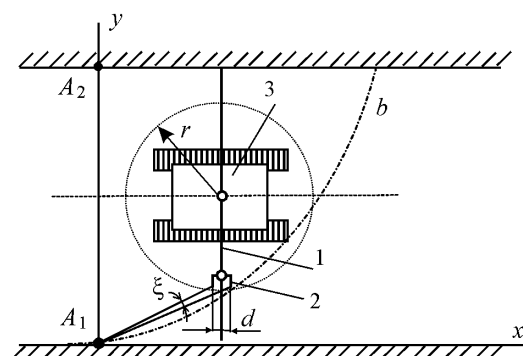


Рис. 3

существует минимальный угол зрения

$$\xi = \operatorname{arctg} \frac{y}{x-d} - \operatorname{arctg} \frac{y}{x} = \operatorname{arctg} \frac{yd}{x(x-d) + y^2},$$

при котором сохраняется обзор захватного устройства.

Чем дальше от точек A_1, A_2 подземный робот продвигается по выработке, тем шире становится зона ненаблюдаемых движений захватного устройства. Минимальное поперечное смещение корпуса относительно точки A_1 , при котором сохраняется ξ , зависит от удаления x робота и описывается уравнением окружности

$$y^2 + x^2 - dx - \frac{d}{\operatorname{tg} \xi} y = 0 \quad (1)$$

с центром в точке $x_0 = d/2$, $y_0 = d/2 \operatorname{tg} \xi$ и радиусом $r = d/2 \sin \xi$.

Построив часть b такой же окружности для второй точки наблюдения A_2 и введя ограничение рабочей зоны стенками выработки, можно определить в ней зону ненаблюдаемых движений захватного устройства S_1 . Учитывая ограничение на ширину выработки $A_1 A_2 = m$ и подставляя $y_1 = m/2$ в (1), найдем расстояние, при котором оператор не сможет видеть захватное устройство в любой точке выработки:

$$x_1 = \frac{d + \sqrt{d^2 - m^2 + 2md/\operatorname{tg} \xi}}{2}.$$

Для нормированной оценки обзорности рабочего органа при дистанционном управлении введем коэффициент обзора

$$K_o = (S_p - S_n)/S_p,$$

где S_p – площадь рабочей зоны или зоны, где может находиться рабочий орган; S_n – площадь зоны невидимости рабочего органа в плоскости его перемещения.

По данным экспериментов при $\xi = 20'$ для большинства горных машин $K_o = 0,4-0,6$. Перенос точки наблюдения с целью лучшего обзора невозможен из-за ограничения рабочей зоны границами выработки. Предложенная оценка обзорности применена для сравнения четырех вариантов размещения двух телекамер с углом зрения 50° на борту подземного робота. Наилучшую обзорность обеспечивает установка одной телекамеры на ближайшем к захватному устройству звене, а другой – на корпусе робота под углом к линии движения.

3.2. Навигация при движении вдоль выработки. Применяемые в машиностроении способы навигации роботов по линейному проводнику или светоотражающей полосе не подходят для горного дела из-за возможности повреждений направляющих и сложности изменения маршрута движения. При постоянном маршруте к кровле выработки подвешивают светоизлучающий кабель. Для разных задач или при изменениях топологии выработок маршрут меняется. В таком случае можно использовать методы автономной навигации по маякам или установленный на борту сканирующий лазерный дальномер, создающий карту местности вокруг робота. При потере или задержке

сигналов в канале передачи информации следует предотвратить неуправляемое движение робота. Во время движения расстояние до стенок выработки не превышает 1 м при средней скорости движения 0,5 м/с. Поэтому робот должен быть оснащен системой защиты от столкновений с препятствиями, а зона его перемещения закрыта от доступа людей. В местах работы расстояние до препятствий составляет 0,1–0,2 м. Следовательно, порог обнаружения препятствий должен зависеть от скорости движения робота.

3.3. *Определение положения робота в пространстве* необходимо: для предотвращения столкновений роботов, контроля исполнения и изменения задач, корректировки системы навигации, переключения алгоритмов управления. На борту робота потребуется разместить двухосевые гироскопы, акселерометр, кодовый измеритель перемещений и одомер, позволяющие измерять положение робота в трехмерном пространстве выработки с учетом скольжения колес.

4. Подбор признаков распознавания состояний среды. Задача состоит в предоставлении информации о среде ограниченным набором датчиков. При подборе признаков распознавания ситуаций возможно как отсутствие необходимого признака, так и ввод лишнего. Это приводит к ошибкам в распознавании ситуаций и росту затрат на систему восприятия. Рассмотрим условия принятия некоторого решения p , когда ситуации из подмножества S_1 меняются на ситуации из подмножества S_2 . Пусть для описания множества ситуаций S выбрано априорное множество признаков A . Разобьем A на три подмножества относительно перехода ситуации из S_1 в S_2 :

- 1) $A_1 = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ – изменение любого признака приводит к принятию решения p ;
- 2) $A_2 = \{a_{k+1}, \dots, a_m\}$ – изменение любого признака не приводит к принятию решения p ;
- 3) $A_3 = \{a_{m+1}, \dots, a_n\}$ – признаки не меняются до и после решения p .

Найдем границы подмножества S_1 . В процессе обучения распознаванию ситуаций наблюдатель фиксирует значения всех признаков ситуаций в i -й момент времени. Если в $(i+1)$ -й момент времени оператор, управляющий роботом, принял решение p_i , то наблюдатель отыскивает изменившийся признак. Если изменений не было, то множество признаков A дополняют новым, позволяющим отличить ситуацию s_{i+1} от ситуации s_i . Признаки из A_2 , которые не меняются для всех решений, исключают из исходного множества. Признаки из A_3 , которые меняются, но не приводят к решению, исключают из описания подмножества S_1 . Таким образом, в процессе обучения формируется набор признаков, необходимый и достаточный для распознавания принадлежности ситуаций к подмножествам, число которых равно числу принимаемых решений.

Для контроля множества признаков среды минимальным набором датчиков на борту робота могут быть применены универсальные средства очувствления (телекамера или широкополосный микрофон), связанные с системой распознавания ситуаций, или смысловая оценка связи сигналов ограниченного набора датчиков. На практике логическая обработка сигнала скорости движения подземного рельсового робота позволила получить 10 признаков среды: направление движения, ускорение, замедление, превышение заданной скорости, сжатие состава, растягивание состава, сход с рельсов, буксование, отказ динамического торможения, невозможность трогания с места [8].

5. Формализация алгоритма управления. Из-за невозможности перечисления всех ситуаций в среде функционирования подземного робота при-

дется распределять функции управления между оператором и бортовой автоматической системой. Переключение режимов дистанционного и автоматического управления позволит оператору управлять с поверхности несколькими машинами. Имитационное моделирование системы «один оператор – несколько машин» на языке GPSS/H® показало, что один оператор сможет управлять с поверхности тремя-четырьмя погрузочно-транспортными машинами [9].

Задача разделения решающими функциями множества ситуаций на подмножества по числу принимаемых решений представляет собой классификационную задачу распознавания образов.

В n -мерном пространстве S , образованном универсальным множеством ситуаций, выделено конечное множество ситуаций S_0 , заданных векторами $S = S(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$, где $\pi_i \in \Pi$ – значение i -го признака ($i = 1, \dots, n$). В $\exists: s \in S_0$ принимается решение $p_1 \in P$ или p_2 из дополнения p_1 до P . Необходимо найти решающие правила для $\forall: s \in S$, обеспечивающие минимум риска ошибочного распознавания S . Для решения задачи при разработке алгоритма управления рельсовым роботом на базе шахтного электровоза с составом вагонок применен метод ситуационного управления [10]. После 16 рейсов по кольцу длиной 2,5 км обучающая выборка содержала 150 ситуаций и 14 команд управления [7]. Ситуации описывались признаками состояний внешней среды: нет препятствий – $a_1 = 1$; задано движение назад – a_2 ; движение запрещено – a_3 ; стрелка переведена влево – a_4 ; задано движение налево – a_5 , а также состояний электровоза: сход с рельсов – $b_1 = 1$; двигатели включены – b_2 ; режим торможения – b_3 ; движение вперед – b_4 ; отключен стояночный тормоз – b_5 ; нет скольжения колес – b_6 ; нет напряжения – b_7 . В обучающей таблице эти признаки были связаны смысловыми понятиями: «быть одновременно – h_1 », «находиться на – h_2 », «совпадать – h_3 », «не совпадать – h_4 », «перед ... – h_5 ». В процессе обучения одинаковые ситуации с разными решениями были разделены дополнительными признаками: расстояние до препятствия больше тормозного пути – $a_6 = 1$; нет движения – b_8 ; нет превышения скорости – b_9 ; не включен звуковой сигнал – b_{10} ; нет замедления движения – b_{11} . Команды управления соответствовали действиям машиниста электровоза: отключить ручной тормоз – $p_1 = 1$; включить режим пуска – p_2 ; изменить направление движения – p_3 ; подать звуковой сигнал – p_4 ; переключить контроллер в позиции пуска – p_5 ; двигаться с заданной скоростью – p_6 ; отключить двигатели – p_7 ; включить подачу песка – p_8 ; включить режим торможения – p_9 ; переключить контроллер в позиции торможения – p_{10} ; включить аварийное торможение – p_{11} ; включить пневмотормоз – p_{12} ; включить стояночный тормоз – p_{13} ; ожидать команды – p_{14} . Из обучающей таблицы были сформированы обобщенные признаки ситуаций: готовность к движению – $f_1 = b_3 b_5 [\bar{a}_2 \bar{b}_4 \vee (a_2 \vee \bar{a}_3) b_4]$; движение разрешено – $f_2 = \bar{b}_7 a_1 \bar{a}_3 (a_4 a_5 \vee \bar{a}_4 \bar{a}_5) \bar{b}_1$; отклонение от нормы – $f_3 = \bar{b}_6 \vee \bar{b}_9 \vee \bar{b}_7$; авария – $f_4 = \bar{a}_1 \bar{a}_6$; движение – $f_5 = b_8$. Это позволило сформировать классы ситуаций, разделенные решающими функциями: пуск – $f_1 f_2 f_5 \vdash V_1$; движение – $f_1 f_2 f_5 \vdash r_6$; служебное торможение – $(\bar{f}_1 \vee \bar{f}_2) f_5 \vdash V_2$; аварийное торможение – $f_4 f_5 \vdash V_3$; ожидание – $(\bar{f}_2 \vee f_3) f_5 \vdash r_{14}$; движение по инерции – $f_2 f_3 f_5 \vdash r_7$; предупредительный сигнал – $f_1 f_5 \vdash r_4$. Знак секвенции \vdash показывает, что если левая часть принимает значение 1, то и правая часть принимает значение 1 [10]. Если левая часть принимает значение 0, то значение

правой части – любое. Устройство управления задано в виде недоопределенного конечного автомата с тремя элементами распределенной памяти.

Первые рейсы робота показали, что для разделения ситуаций требуется ввод таких дополнительных признаков, как распознавание разных режимов превышения скорости, сжатие и растягивание состава, снижение эффективности торможения, прерывание команд скорости.

6. Изменение выполняемых функций и динамических характеристик. Функциональная гибкость подземного робота (f_3) оценивается как

$$K_f = N(F_m \cap F_e) / N(F_e),$$

где $F_m \subseteq F$, $F_e \subseteq F$, F – множества технологических функций, мощность N которых зависит от требований к процессу (F), степени универсальности механической базы (F_m) и состояний среды функционирования (F_e).

Стабильность алгоритмов управления (f_6) может оцениваться как $K_s = m/n$, где m – число различных алгоритмов в n рабочих циклах. Экспериментально установлено, что для погрузочно-транспортной машины в процессе заполнения ковша $K_s = 0,05-0,16$, в процессе движения по выработке $K_s = 0,05-0,50$.

7. Целесообразность применения робототехники в горном деле. Полностью заменить роботами горнорабочих невозможно из-за операций, неподдающихся роботизации. Больших затрат потребует создание высокоскоростных каналов передачи видео-, аудио- и цифровой информации между мобильными подземными роботами и операторами на поверхности. Необходимо разработать средства управления в изменяющейся среде, навигации и позиционирования роботов в выработках. Потребуется обеспечить взрыво-безопасность и механическую защиту технических средств.

Целесообразность ввода робототехники в горное дело можно оценить по изменению соотношения затрат живого и овеществленного труда.

Роботизированная технология горных работ характеризуется годовой производительностью Q_i , затратами на оборудование K_i , сроком эксплуатации N_i , ежегодными расходами на рабочую силу Z_i , материалы и энергию C_i . Отношение добычи $Q_i N_i$ к затратам на роботизацию за срок эксплуатации N_i показывает, насколько совершенной будет роботизированная технология добычи:

$$P_i(N_i) = \frac{Q_i N_i}{K_i + N_i(C_i + Z_i)}.$$

Такое же отношение $P_0(N_0)$ может быть получено и для существующей тех-

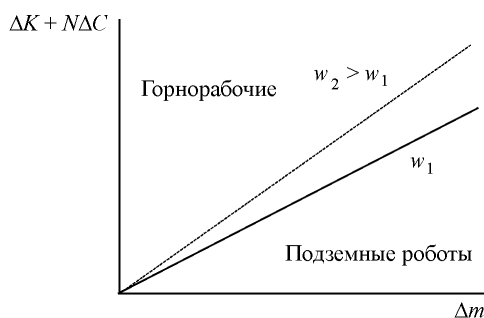


Рис. 4

нологии. Переход к роботизированной технологии целесообразен, если

$$S = \frac{P_i(N_i)}{P_0(N_0)} = \frac{Q_i N_i [K_0 + N_0 (C_0 + Z_0)]}{Q_0 N_0 [K_i + N_i (C_i + Z_i)]} > 1.$$

Используя полученное соотношение, определим, сколько рабочих, занятых ручным трудом, должен высвобождать один подземный робот. Если $K_0 = 0$, $C_0 = 0$ и $Q_0 = Q_i$, то

$$\frac{T_0 w_0 m_0 N}{K_i + N (C_i + T_i w_i m_i)} > 1,$$

откуда

$$m_0 > \frac{K_i + N (C_i + T_i w_i m_i)}{T_0 w_0 N}.$$

Чем больше затраты на роботизацию K_i и меньше стоимость рабочей силы w_0 , тем больше горнорабочих должно быть заменено роботами. С другой стороны, чем больше затраты на эксплуатацию роботов $(C_i + T_i w_i m_i)$, тем менее они эффективны.

Критерий целесообразности роботизации может быть использован для построения границы целесообразности замены труда горнорабочих средствами робототехники (рис. 4):

$$\Delta K + N \Delta C = N \Delta Z,$$

где $\Delta Z = T_i w_i \Delta m$; w_i – стоимость часа труда горнорабочего; $\Delta m = m_0 - m_i$ – сокращение затрат на рабочую силу; $\Delta K = K_i - K_0$ – дополнительные затраты овеществленного труда на средства робототехники и живого труда $\Delta C = C_i - C_0$ на их обслуживание.

Заключение. Управление подземными роботами имеет принципиальные особенности, связанные с их перемещением в ограниченном пространстве с непредвиденными изменениями среды. Экспериментальная оценка технологий подземной добычи полезных ископаемых с позиции роботизации необходима для выбора и направленной подготовки объектов роботизации, обоснования концепции применения робототехники. Для этого экспериментально отыскивают нормированные коэффициенты изменчивости алгоритма управления, соотношения зон ненаблюдаемых движений рабочего органа и рабочей зоны робота, влияния выполняемых работ на характеристики управления. Предлагается формировать набор признаков среды и алгоритм управления подземным роботом в процессе наблюдения за действиями человека. Оценка целесообразности роботизации подземных работ по соотношению затрат живого и овеществленного труда позволит определить лимит затрат на роботизацию, минимальное повышение производительности, границу целесообразности замены горнорабочих роботами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bartel E.** Industrial robots and potential applications in mining // Proc. of the American Mining Congress. San-Francisco, CA, 1983. P. 24.

2. **Baiden G., Scoble M., Flewelling S.** Robotic Systems Development for Mining Automation. Canadian Institute of Mining and Metallurgy. AGM. 1992. P. 34.
3. **Копуух V.** Shapes of robotization in mining // Proc. of the 26th Intern. Symp. on Computer Application in the Mineral Industries (APCOM'26). University Park: Pennsylvania State University, 1996. P. 197.
4. **Бородин С. М.** Оценка сложности систем и процессов // Автоматизированные системы управления. Л.: ЛГУ, 1974. Вып. 1. С. 21.
5. **Лазарев В. Г., Пийль Е. И.** Синтез управляющих автоматов. М.: Энергия, 1978.
6. **Конюх В. Л.** Прогнозная оценка сложности управления подземным погрузочно-транспортным роботом // Автоматизация и связь в горном деле. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1984. С. 25.
7. **Конюх В. Л., Тайлаков О. В.** Предпроектный анализ шахтных робототехнических систем. Новосибирск: Наука, 1991.
8. **Конюх В. Л.** Опыт очувствления подземных транспортных роботов // Тр. IV Всесоюз. совещания по робототехническим системам. Киев: Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова АН УССР, 1987. С. 277.
9. **Конюх В. Л., Рамазанов Р. А.** Управление подземными погрузочно-транспортными машинами с поверхности // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2004. № 4. С. 61.
10. **Поспелов Д. А.** Логико-лингвистические модели в системах управления. М.: Энергия, 1981.

Поступила в редакцию 19 сентября 2005 г.
