

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОДЗЕМНЫХ РАБОТ

В.Л. Конюх (Новосибирский государственный технический университет)

Объективной предпосылкой создания подземной робототехнической системы является ухудшение условий труда горнорабочих. Перемещение роботов в изменяющейся среде с ограниченной обзорностью рабочей зоны требует предварительной оценки подземных работ как объектов роботизации. Предложен метод оценки целесообразности роботизации подземных работ по перераспределению видов труда.

Предстоящий переход к добыче полезных ископаемых на больших глубинах сделает невозможной работу людей из-за повышения температуры окружающих пород. С каждым годом растут затраты на обеспечение безопасности труда, проветривание, перемещение людей по выработкам. В начале 90-х годов XX века эксперты считали возможным заменить подземных рабочих роботами, созданными для машиностроения [1]. Время показало, что для подземных работ не может быть использован опыт создания робототехнических систем в машиностроении (таблица).

Подземные роботы будут работать с повышенными нагрузками в изменяющейся среде и перемещаться в ограниченном пространстве выработки. Возникли задачи оценки подготовленности горных работ к роботизации, управления в изменяющейся среде, навигации при движении в выработке, определения положения робота в подземном пространстве, получения информации о рабочей зоне [2].

В 1967 г. на угольной шахте "Генерал Блюменталь" в Германии было реализовано вождение поездов без машинистов. Бурильные установки с перепрограммируемым позиционированием бурильной головки, позволившим вдвое сократить время наведения на точки бурения, создавались во Франции, Японии и Норвегии. С 80-х годов стали разрабатывать системы дистанционного управления погрузочно-транспортными машинами для погрузки руды в опасных местах. Несмотря на потери времени из-за перехода машиниста в безопасное место, полное извлечение руды позволило окупить затраты на создание системы в течение месяца. В 1976 г. проф. М. Тринг (Великобритания) предложил выемку весьма тонких пластов угля с помощью дистанционно управляемого манипулятора, состоящего из двух корпусов, связанных тремя гидроцилиндрами, двух манипуляторов и двух телекамер, передающих информацию четырем операторам на поверхности [3]. Ожидалось, что в угольной промышленности США роботы к 1995 г. заменят подземных рабочих. Работы по программам "Интеллектуальная шахта" (Швеция, Норвегия, Финляндия), KUJ 2000 (Швеция), "Автоматизация в горном деле" (Канада), CSIRO (Австралия) направлены на разработку подземных робототехнических систем с целью обеспечения безопасности и более полного использования оборудования. Испытания подземных манипуляторов для вспомогательных операций показали, что удаленному из рабочей зоны оператору трудно воспринимать усилия в звеньях манипулятора и получать информацию о зоне обслуживания в ограниченном пространстве выработки. Мно-

гие операции в ориентированных на человека технологиях были сложны для роботов. Используя опыт космической робототехники, фирма *Automated Mining System* (Канада) в 1994 г. разработала систему управления погрузочно-транспортными машинами с поверхности на руднике Cooper Cliff North Mine [4]. Такие же системы стали применять на крупнейших рудниках ЮАР, Швеции, Чили, Финляндии, Германии.

Области применения робототехнических систем для подземных работ [5]:

- ввод дистанционно-управляемых манипуляторов для механизации ручных работ в существующих технологиях;
- создание технологических роботов на базе горных машин, оснащенных системами адаптивного управления;
- применение инспекционных роботов для получения информации из недоступных мест.

Главным препятствием является влияние на управление непредсказуемых изменений подземной среды, таких как свойства горной массы и окружающих пород, проявления горного давления, размеры выработок, перемещение рабочего места, изменение технологических операций, появление препятствий на пути движения.

Таблица. Отличия робототехнических систем

Свойство	Машиностроение	Подземные работы
Цель применения	Автоматизация многономенклатурного производства	Повышение безопасности подземных работ
Главная особенность	Изменение функций в постоянной среде	Постоянство функций в изменяющейся среде
Рабочее место	Не движется	Двигается
Технологическая 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	В течение неограниченного времени с помощью специальных средств	В течение ограниченного времени на рабочем месте
Изменение оборудования	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

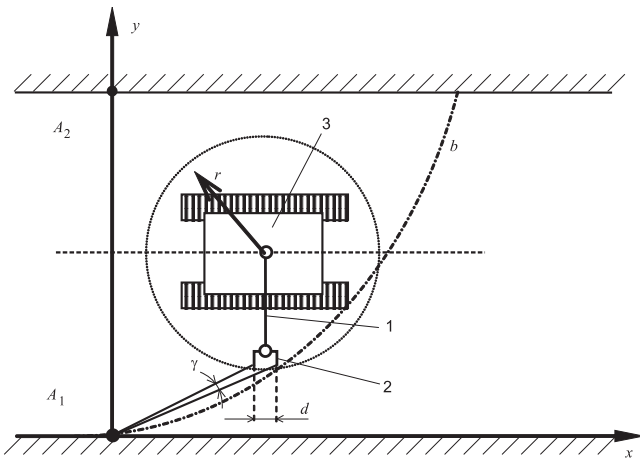


Рис. 1. Обзорность рабочего органа подземного робота

Введя допущения нормального закона распределения времени рабочего цикла и функциональной стабильности человека-оператора, оценим влияние изменений признаков подземной среды на управление объектом роботизации. Пусть в результате хронометража получена выборка времени рабочего цикла:

$$t_1, t_2, \dots, t_n$$

с выборочной дисперсией $D_n(t)$. Выборка содержит $m \leq n$ вариантов. Каждый вариант – последовательность управления при некотором состоянии среды. Но для варианта выборки $t_i, \dots, t_{i+k}, \dots, t_m$ тоже можно найти дисперсию $D_m(t)$. Если управление не зависит от среды, то $D_n(t) = 0$. Чем больше вариантов в выборке, тем сильнее среда влияет на управление. Если среда влияет на управление в каждом рабочем цикле, то $m = n$. Следовательно, нормированный критерий сложности принимает вид:

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

Сравнение метода с четырьмя методами оценки сложности управления по формализованным описаниям алгоритма управления позволило применить его для 23 видов подземных работ с целью выбора и подготовки объектов роботизации [2].

Другой проблемой является ограничение обзорности рабочей зоны. Манипулятор I длиной r оснащен рабочим органом 2 и поворачивается на корпусе 3 подземного робота в плоскости его перемещения по выработке (рис. 1).

Рабочим органом может быть захватное устройство, губки которого раздвинуты на расстояние d и перпендикулярны оси выработки. Технологические операции сводятся к наведению захватного устройства на объект манипулирования. Для крайних точек наблюдения A_1, A_2 существует минимальный угол зрения γ , при котором рабочий орган остается наблюдаемым.

Чем дальше робот удаляется от оператора, тем шире становится зона ненаблюдаемых движений захватного устройства. Минимальное поперечное смещение

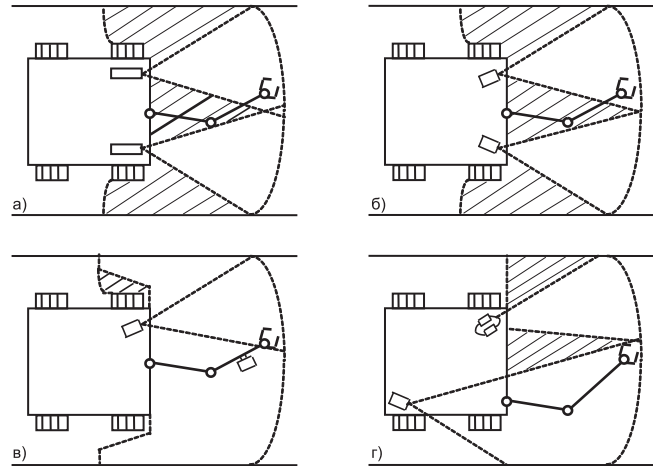


Рис. 2. Карты обзорности при установке бортовых телекамер: а – параллельно линии движения; б – под углом друг к другу; в – на манипуляторе и корпусе; г – для стереоизображения зоны обслуживания

ние захватного устройства относительно точки наблюдения A_1 , при котором поддерживается γ , зависит от его удаления x от оператора.

Граница b зоны движений рабочего органа, наблюдаемых из точки A_1 , представляет собой часть окружности. Такая же граница может быть построена для точки A_2 . Таким образом, зона ненаблюдаемых движений захватного устройства S_n представляет собой площадь, ограниченную стенками выработки и кривыми движений рабочего органа, ненаблюдаемых из зоны перемещений оператора $A_1A_2 = m$, где m – ширина выработки.

Степень обзорности рабочего органа можно оценить нормированным коэффициентом обзора:

$$K_o = \frac{S_p - S_n}{S_p},$$

где S_p – площадь рабочей зоны; S_n – площадь ненаблюдаемых движений рабочего органа.

По экспериментальным данным $K_o = 0,4...0,6$ при $\gamma = 20^\circ$. Улучшение обзорности путем переноса точки наблюдения невозможно из-за ограниченных размеров выработки. Сравнение коэффициентов обзора для четырех вариантов размещения двух телекамер на борту подземного робота (рис. 2) показало, что лучше всего установить одну камеру на ближайшем к рабочему органу звене, а вторую – в левом переднем углу корпуса робота под углом к линии движения (рис. 2, в).

При синтезе организационно-производственных структур робототехнических систем в машиностроении перебирают комбинации сочетаний технологических маршрутов для заданной программы выпуска изделий [6]. В отличие от машиностроения робототехническая система для подземных работ представляет собой перемещающийся набор специализированных роботов, выполняющий заданную последовательность технологических операций.

Для выбора структуры робототехнической системы применен метод функционального моделирования,

при котором выемочный (РВ), бурильный (РБ), крепе-передвигающий (РКП), крепеустанавливающий (РКУ), транспортный (РТ) и информационно-вспомогательный (РИВ) роботы представлялись наборами основных и вспомогательных функций. Структуры синтезировались путем соединения абстрактных моделей роботов технологической (согласование операций во времени и пространстве), кинематической (механическое соединение машин), конструктивной (совмещение функций в одной конструкции) связями [7] и управляющей (управление последовательностью операций) связями. Например, одна из структур робототехнической системы для проведения выработки (рис. 3) представлена структурной формулой:

$$\begin{aligned} & \text{РВ} - \text{ТР} \\ & \quad :+ \\ & \text{РИВ} - \text{РКУ} + \text{К} \end{aligned}$$

Транспортный робот РТ вывозит горную массу от выемочного робота РВ к конвейеру и возвращается с элементами крепи К. Робот-крепеустановщик РКУ ставит крепь под контролем информационно-вспомогательного робота РИВ. Таким образом, выемочный робот РВ связан технологической связью (-) с транспортным роботом РТ и управляющей связью (:+) с роботом-крепеустановщиком РКУ. Транспортный робот РТ соединен кинематической связью с крепью К, загружаемой на его платформу. С другой стороны, робот-крепеустановщик РКУ соединен технологически с информационно-вспомогательным роботом РИВ и кинематически - с крепью К. В этой структуре отсутствует конструктивная связь (*), поскольку в технологии нет совмещения конструкций роботов.

Взаимодействие роботов в системе имитировалось перемещением маркеров по сети Петри. С помощью имитационных экспериментов оценивались удельная трудоёмкость и производительность для каждой из 30 разработанных структур робототехнических систем.

Способы навигации движущегося робота по линейному проводнику или светоотражающей полосе, применяемые в машиностроении, неприемлемы для подземных работ из-за возможности повреждений направляющих и сложности быстрого изменения маршрута движения. При движении по фиксированному маршруту в качестве направляющей подвешивают светоизлучающий кабель. При движении по разным маршрутам придется применять методы автономной навигации. В случаях задержки или потери команды управления необходимо предотвратить неуправляемое движение подземного робота, движущегося со скоростью более 0,5 м/с в выработке шириной 3...4 м. На борту робота должна быть система защиты от столкновений с препятствиями, а зона его перемещений закрыта от доступа людей. При движении по выработке расстояние до препятствий составит около 1 м, а при выполнении рабочих операций - 0,1...0,2 м. Следовательно, порог обнаружения препятствий должен зависеть от скорости движения робота.

Для предотвращения столкновений, контроля работы и изменения задач, корректировки системы на-

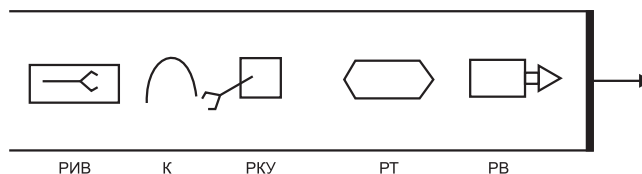


Рис. 3. Роботизированная технология проведения выработок

вигации, переключения алгоритмов управления необходимо определить положение робота в выработке с помощью стационарных маяков, бортового гироскопа, акселерометра, энкодера и одометра. Система радиочастотной идентификации *RFID* может быть применена не только для позиционирования робота, но и в качестве источника информации для планирования подземных работ.

Коэффициенты стабильности передаточных функций показывают, как рабочая нагрузка *R* влияет на коэффициенты передачи (*a*) и постоянные времени (*T*) механической базы робота:

$$K_a = (\Delta a R / (a \Delta R)); K_t = (\Delta T R) / (R \Delta T);$$

$$K_a = \frac{\Delta a / a}{\Delta R / R}.$$

В результате идентификации движущегося шахтного поезда как объекта управления установлено, что $K_a = 0,06...0,08$; $K_t = 0,01$ [2]. Опыт внедрения робототехнической системы электровозного транспорта на действующем руднике показал, что системы автоматического регулирования скорости приводов должны быть дополнены системами распознавания технологических ситуаций, возникающих в процессе взаимодействия роботов [8, 9]. Больших затрат потребует создание высокоскоростных каналов обмена видео-, аудио- и цифровой информацией между подземными роботами и операторами на поверхности.

Оценим целесообразность создания робототехнической системы для подземных работ по перераспределению затрат живого и овеществленного труда. Роботизированная технология подземных работ характеризуется годовой производительностью Q_i , единовременными затратами на оборудование K_i , сроком эксплуатации N_i , ежегодными расходами на рабочую силу Z_i , материалы и энергию C_i . Отношение суммарной производительности $Q_i N_i$ к общим затратам на роботизацию за срок эксплуатации N_i

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

показывает, насколько совершенной будет роботизированная технология. Такое же отношение $P_0(N_0)$ может быть получено и для существующей технологии. Переход к роботизированной технологии целесообразен, если

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

Используя полученное соотношение, оценим, сколько рабочих, занятых ручным трудом, должен высвободить один шахтный робот. Пусть $Z = Twm$, где T – годовое число рабочих часов; w – стоимость часа работы; m – число рабочих. Если $K_0 = 0$, $C_0 = 0$, и $Q_0 = Q_i$, то

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

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

Чем меньше затраты на роботизацию K_i и стоимость рабочей силы w_0 , тем больше горнорабочих может быть заменено роботами. С другой стороны, чем больше затраты на эксплуатацию роботов ($C_i + T_i w_i m_i$), тем дальше находится граница их эффективности.

Критерий целесообразности роботизации может быть использован для построения границы целесообразности замены труда горнорабочих средствами робототехники (рис. 4) $\Delta K + \Delta C = \Delta Z$, где $\Delta Z = T_i w_i \Delta m$; $\Delta m = (m_0 - m_i)$ – сокращение затрат на рабочую силу; $\Delta K = K_i - K_0$ – дополнительные затраты овеществленного труда на создание средств робототехники и живого труда $\Delta C = C_i - C_0$ на их обслуживание.

Выводы

Робототехническая система для подземных работ отличается перемещением в ограниченном пространстве с непредвиденными изменениями среды. Хотя история шахтной робототехники началась в 1967 г., роботы для подземных работ практически не созданы. Их ввод будет поэтапным:

- создание телеуправляемых манипуляторов для механизации ручных работ;
- чередование дистанционного и автоматического управления горной машиной сначала при прямой видимости, затем с поверхности;
- согласование действий нескольких роботов в технологии подземных работ;
- обмен информацией между распределенными системами управления роботами и поверхностью;
- переход к проектированию, управлению и планированию в РВ.

Выполнение подземных работ с помощью робототехники позволит полнее использовать подземное

Конюх Владимир Леонидович – д-р техн. наук, проф. Новосибирского государственного технического университета.

E-mail: automation2004@list.ru

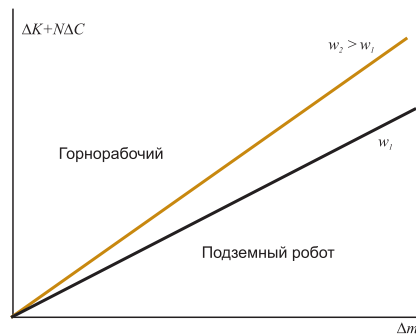


Рис. 4. Граница между дополнительными затратами на робототехнику $\Delta K + \Delta C$ и числом Δm высвобождаемых рабочих для разной стоимости часа работы w_i

оборудование, преодолеть границы психофизиологических возможностей человека, уменьшить число подземных рабочих и сократить затраты на их жизнеобеспечение, снизить высоту подземных выработок, приобрести опыт добычи полезных ископаемых на других планетах. Наиболее перспективен переход к управлению подземными машинами с поверхности.

Работа выполнялась при поддержке гранта CRG OUTFR № 960628 "Имитация и анима-

ция процессов добычи угля в России" (Научный комитет НАТО), грантов № 94-01-00042 "Теория шахтных роботов" (РФФИ) и У043/.995 "Подготовка кадров в области информационных технологий производства для промышленности Кузбасса" (Федеральная целевая программа "Интеграция науки и высшего образования России на 2002-2006 гг.").

Список литературы

1. Bartel E. Industrial robots and potential applications in mining. Proc. of the American Mining Congress. San-Francisco, CA, 1983.
2. Конюх В.Л. Шахтная робототехника. Кемерово: Кузбассвуиздат, 2000.
3. Thring M. Mining without men underground, Electrical Review, 198 (24), 1976.
4. Baiden G., Scoble M., Flewelling S. Robotic systems development for mining automation, Canadian Institute of Mining and Metallurgy, AGM, 1992, May.
5. Konyukh V. Shapes of robotization in mining. Proc. of the 26-th Intern. Symp. on Computer Application in the Mineral Industries (APCOM'26), USA: University Park., PE 1996, 197-200.
6. Лищинский Л.Ю. Структурный и параметрический синтез гибких производственных систем. М: Машиностроение, 1990.
7. Солод В.И., Гетопанов В.Н., Рачек В.М. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов. М.: Недра, 1982.
8. Konyukh V. Use of Intelligent Automation for Mine Robot Cars / Proc. of the Third International Symposium on Mine Mechanization and Automation. – USA: Golden, Colorado School of Mines, 1995. V.1.
9. Конюх В.Л. Опыт очувствления подземных транспортных роботов // IV Всесоюзное совещание по робототехническим системам. Украина: Киев. Институт кибернетики им. В.М. Глушкова АН УССР, 1987.

Компания IPC2U и MOXA объявили об открытии совместного Internet-проекта www.moxa-net.ru

Компании плодотворно сотрудничают более 10 лет, поставляя на российский рынок высококачественное оборудование для систем промышленной автоматизации. Возможности сайта позволяют предоставлять российским пользователям актуальную и достоверную информацию о продуктовых

линейках компании MOXA, включая полные технические описания устройств, документацию и примеры применения. Кроме этого на сайте размещается информация о новинках продукции MOXA и совместных маркетинговых мероприятиях, проводимых компаниями в России.

[Http://www.ipc2u.ru](http://www.ipc2u.ru)