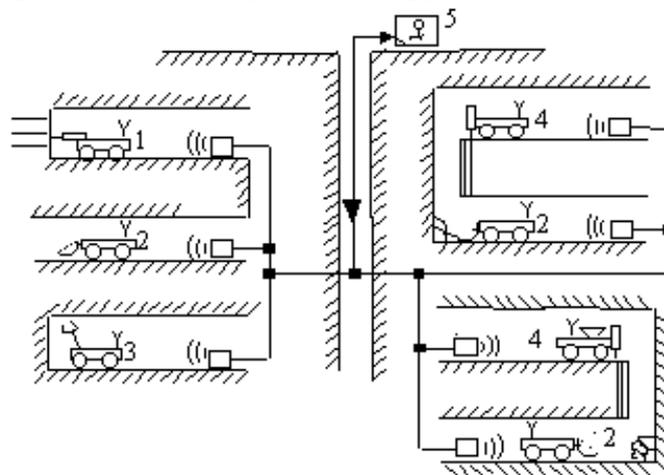


## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В РАЗРАБОТКЕ КОНЦЕПЦИИ РУДНИКА БУДУЩЕГО

В. Л. Конюх (Новосибирск)

Предстоящий переход к добыче полезных ископаемых на глубине более 1 км, где остались основные запасы полезных ископаемых, будет сопровождаться повышением температуры и изменением свойств горного массива. Это сделает невозможной работу подземных горнорабочих. Идея переноса на поверхность кабины машиниста, соединенной информационным каналом с подземной машиной, была предложена в 1989 г. [1] и с 1993 г реализуется на крупнейших рудниках [2].



**Рис. 1. Схема управления самоходными машинами с поверхности:**

1 – буровая машина; 2 – погрузочно-транспортная машина; 3 – набрызг-бетонная машина; 4 – зарядная машина; 5 – кабина оператора

Оператор передает команды управления самоходной машиной, наблюдая через телекамеры за показаниями бортовых приборов машины и рабочей зоной (рис. 1). Чередую дистанционное управление с автоматическим, он может управлять несколькими машинами.

Для рудника будущего необходимо создать распределенную в выработках сеть для обмена аудио-, цифровой и видеоинформацией в реальном времени, оснастить подземные машины средствами навигации, позиционирования и автоматического управления, сформировать алгоритмы человеко-машинного управления добычей. Их проверка на существующих рудниках потребует крупных затрат, поэтому для формирования концепции рудника будущего применен метод дискретно-событийного имитационного моделирования [3]. После разработки и валидации имитационной модели альтернативные проектные решения преобразовывались в вопросы «Что, если...?» и проверялись путем проведения имитационных экспериментов. Ставились задачи определения максимального числа машин для одного оператора, распределения управления машинами для нескольких операторов, выбора решения о переходе к автоматическому управлению, отыскания соотношения рабочих мест и автономных машин, доставки грузов к распределенным под землей рабочим местам. Поставленные задачи не поддавались аналитическому решению из-за случайных изменений условий работы и перемещений рабочих мест.

**Разработка модели.** Процесс управления представлен замкнутой однофазной  $N$ -канальной системой массового обслуживания (СМО) с ограниченным числом заявок  $L$  и длиной очереди  $Q=0, \dots, L$ , где  $N$  – число операторов,  $L$  – число машин (рис. 2).

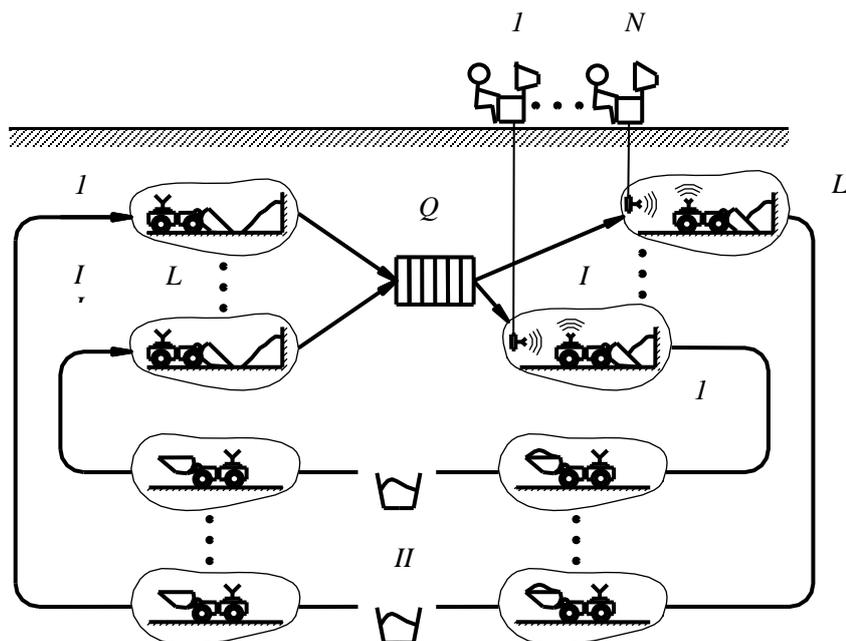


Рис. 2. Управление погрузочно-транспортными машинами с поверхности как система массового обслуживания

По данным хронометража времени движения и зачерпывания входной поток заявок отнесен к пуассоновскому. Погрузочно-транспортная машина (ПТМ) может находиться в одном из трех состояний: I – оператор управляет погрузкой с поверхности; II – машина в автоматическом режиме движется к месту разгрузки, разгружается и возвращается к месту погрузки; III – машина ожидает команд оператора. Модель разработана в средах GPSS/H® и Extend®. Ее валидация проводилась путем сравнения расчетов коэффициентов загрузки оператора и использования машин при  $N = 4$ ,  $L = 7$  с результатами имитационного моделирования.

**Степень загрузки оператора  $\eta$  при изменении доли автоматизированных операций  $K$  и числа машин.** Это одноканальная СМО типа  $M/M/1$ . В результате имитационных экспериментов установлено, что с повышением  $K$  от 0,4 до 0,8 оператор способен управлять пятью машинами с загрузкой 90% (рис. 3). Однако при неполной загрузке оператора возможны простои из-за одновременного прихода машин к местам погрузки [4].

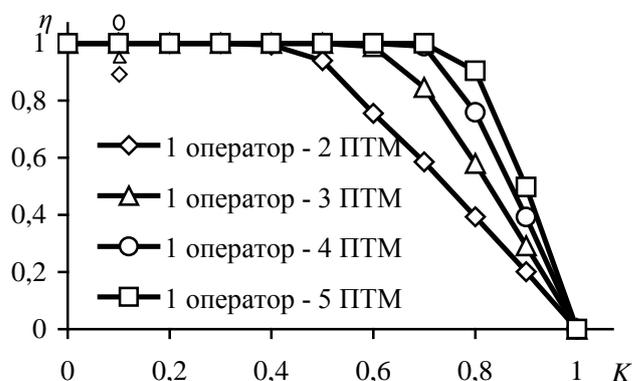


Рис. 3. Зависимость коэффициента загрузки  $\eta$  оператора от доли автоматизированных операций  $K$  и числа машин

**Дисциплина обслуживания для  $N$  операторов, управляющих  $L$  машинами.** Сравнивались два типа обслуживания: «оператор выбирает первую машину из очереди» ( $M/M/N$ , где  $N = 3$ ,  $L = 7$ ), «один из трех операторов выбирает первую из закрепленных за ним машин» (три независимых СМО типа  $M/M/1$ ). При доле автоматизированных операций 45–75% расхождение значений производительности не превышает 4,5%.

**Влияние закона распределения времени дистанционного и автоматического управления на загрузку оператора.** Оценивались коэффициенты загрузки трех операторов, управляющих семью машинами для нормальных (со стандартными отклонениями 5% и 20%) и экспоненциального законов распределения времени движения и погрузки. Расхождение появляется при  $K = 0,4 \dots 0,7$  и составляет около 10%. Следовательно, при создании системы можно обойтись без статистической обработки хронометражных данных.

**Принятие решения о переходе от дистанционного к автоматическому управлению.** После каждого зачерпывания руды заполнение ковша является случайным. При какой стратегии перехода к автоматическому управлению сменная производительность будет выше: повторять зачерпывание 5–6 раз до полного заполнения ковша или прекращать погрузку, компенсируя неполное заполнение дополнительными рейсами?

Обе стратегии отображены сетью Петри с задержками маркеров в позициях, соответствующих хронометражным данным [5]. В экспериментах оценивалась сменная производительность  $Q$  для случайных коэффициентов заполнения  $k$  и заданной длины доставки  $L$ . Установлено, что максимальная сменная производительность при  $L = 45$  м и времени зачерпывания 10 с достигается при заполнении ковша не менее, чем на 65% (рис. 4).

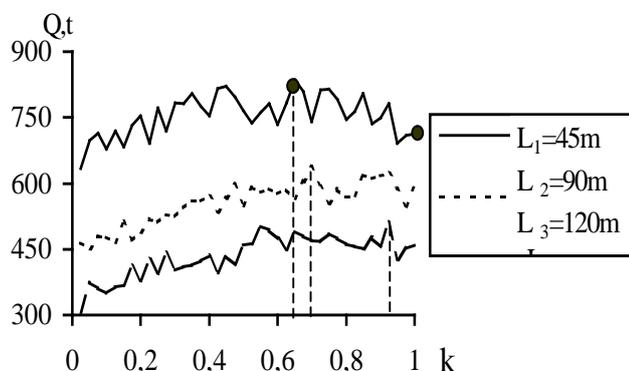


Рис. 4. Сменная производительность  $Q$  в зависимости от заполнения ковша  $k$  и длины доставки  $L$

Сигнал перехода к автоматическому управлению должен формировать интеллектуальный датчик заполнения ковша, установленный на борту машины и меняющий настройку в зависимости от длины доставки.

**Определение соотношения рабочих мест и автономных машин.** Задача возникает, если для определенной технологической последовательности количество специализированных самоходных машин меньше числа обслуживаемых ими рабочих мест. Как согласовать работу машин, обеспечивающую минимум простоев движущихся рабочих мест?

Модель разработана на GPSS/H® и анимирована с помощью Proof Animation®. В имитационных экспериментах для заданной последовательности на входе изменялись

число машин и расстояние до рабочих мест, оценивалась степень использования машин.

В результате имитационного моделирования выбрано расписание работ.

**Доставка грузов к распределенным рабочим местам.** Один транспортный робот по разным маршрутам доставляет грузы от склада к рабочим местам, откуда поступают запросы на доставку. Время движения к рабочему месту и интервал поступления запросов – случайные. Найти среднее время ожидания груза, степень использования робота и средний размер очереди.

Модель разрабатывалась на GPSS/H® и Extend® с анимацией результатов экспериментов на языке Proof Animation®. На входе модели изменялись число рабочих мест, случайное время движения транспортного робота к каждому рабочему месту и случайный интервал поступления запросов. С помощью моделирования оценивались степень использования робота, средний размер очереди в ожидании доставки и время ожидания. Так, найдена зависимость средней длины очереди  $q$  от числа рабочих мест  $n$  и скорости движения  $v$  при времени выполнения запроса  $60 \pm 10$  мин и интервале поступления запросов  $120 \pm 20$  мин (рис. 5).

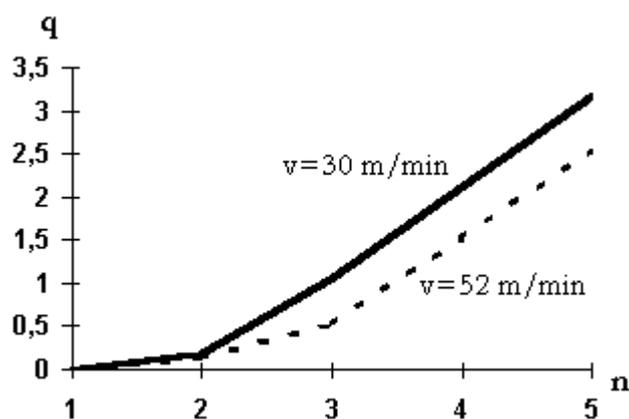


Рис. 5. Зависимость средней длины очереди  $q$  от числа рабочих мест  $n$  и скорости движения робота

Имитационные эксперименты позволяют сделать следующие выводы:

при времени рабочего цикла 5 мин и доле автоматизированных операций менее 60% оператор с поверхности может управлять тремя машинами;

дисциплина обслуживания F-I-F-O при управления закрепленными за операторами машинами снижает производительность на 4,5% по сравнению с выбором любой первой машины;

при длине доставки 45 м и времени дистанционного управления 10 с максимальная сменная производительность достигается при заполнении ковша не менее, чем на 65%;

при поступлении заявок с интервалом 80–200 мин от пяти рабочих мест на расстоянии 50–100 м и доставке грузов одной транспортной единицей время ожидания выполнения заявки составит 200–250 мин.

Разработанные модели могут применяться не только для обоснования концепции рудника будущего, но и для решения других практических задач [6].

Автор благодарен аспирантам В. В. Давиденко, В. В. Зиновьеву, Я. Б. Игнатьеву, Р. А. Рамазанову за помощь в разработке моделей.

---

**Литература**

1. **Конюх В. Л.** Предпроектный анализ шахтных робототехнических систем/В. Л. Конюх, О. В. Тайлаков. Новосибирск: Наука. Сиб. отд, 1991. 182 с.
2. **Baiden G.** LHD teleoperation and guidance – proven productivity improvement tools/G. Baiden, E. Henderson//CIM Toronto'94, May 1994.
3. **Sturgul J.** Mine design using simulation/J. Sturgul. USA: *Society of Mining Engineers*, 2000, 232 p.
4. **Конюх В. Л. , Рамазанов Р. А.** Управление подземными погрузочно-транспортными машинами с поверхности//Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2004. № 4. С. 61–66.
5. **Konyukh V.** Robotics for mining/Mineral Resources Engineering. Vol. 11, No. 1 (2002). Pp. 73–88.
6. **Конюх В. Л.** Методы имитационного моделирования систем. Применение программных продуктов/В. Л. Конюх, Я. Б. Игнатъев, В. В. Зиновьев//*Электронное изд. зарег. в Федеральном депозитарии электронных изданий, № 0320401123*. Рег. свид. ФГУП НТЦ «Информрегистр» от 6.09.2004, .№ 4753.