

# Разработка дискретно-событийных моделей роботизированных технологий проведения горных выработок\*

## ЗИНОВЬЕВ Василий Валентинович

Старший научный сотрудник  
Института угля СО РАН,  
доцент кафедры ИиАПС КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева,  
канд. техн. наук, доцент, г. Кемерово, Россия,  
тел.: +7 (3842) 74-10-45

## СТАРОДУБОВ Алексей Николаевич

Старший научный сотрудник  
Института угля СО РАН,  
доцент кафедры ИиАПС КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева,  
канд. техн. наук, г. Кемерово, Россия,  
тел.: + 7 (3842) 74-10-45,  
e-mail: a.n.starodubov@gmail.com

Предложен подход к построению дискретно-событийных моделей роботизированных технологий проведения горных выработок для решения задач многовариантного анализа и выбора оптимального варианта компоновки оборудования при проектировании новых производств. Созданы имитационные модели, отображающие работу основных подсистем технологий проведения горных работ.

**Ключевые слова:** горные выработки, компоновка оборудования, системы массового обслуживания, имитационное моделирование.

Распределение всех рабочих по процессам подземной добычи угля показывает, что самая большая доля ручного труда связана с подготовительными работами, где 36 % рабочих ручного труда занимаются креплением, 25 % — доставкой крепи, 12 % — погрузкой угля и породы, 10 % — взрывными работами, 17 % — прочими работами. Исходя из этого, в первую очередь необходимо роботизировать и исследовать горнопроходческие работы. В качестве объектов роботизации применительно для шахт Кузбасса выбраны четыре известные технологии проведения горных выработок, которые позволяют отображать большинство применяемых способов проходки. Это технологии буровзрывной проходки индивидуальными машинами, буровзрывным комплексом, комбайном избирательного действия, винтоповоротным проходческим агрегатом.

Разнообразие предложений по роботизации горнопроходческих работ и их высокая стоимость, различие условий залегания и добычи полезных ископаемых, многовариантность способов организации работ делают це-

лесообразным на стадии проектирования перебор вариантов проведения горных выработок на компьютерных моделях [1, 2].

Большинство операций в горнопроходческих работах является дискретным с конечным числом значений переменных. К таким операциям относятся: начало и окончание буровзрывных работ, погрузка и разгрузка угля, начало и окончание работы комбайна или проходческого комплекса. Функционирование такой системы можно представить как последовательную смену состояний в дискретные моменты времени. Известно, что одним из мощнейших математических аппаратов для описания дискретных процессов является теория массового обслуживания [3].

Разработана концептуальная модель роботизированной технологии проведения выработок, отображающая технологии с буровзрывным, комбайновым и щитовым способами проходки. Модель представлена в виде «черного ящика» с управляемыми и неуправляемыми входами (рис. 1).

К управляемым входам ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ) отнесены конструктивные и технологические параметры (число проходческих машин, глубина и количество шпуров, продолжительность технологических операций, тип характеристики оборудования и т. п.). К неуправляемым входам ( $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ ) — физико-механические свойства вмещающих пород, технические параметры проводимой выработки. Выходом модели ( $Z_1, Z_2, \dots, Z_k$ ) являются продолжительность проходческого цикла и степень использования оборудования.

Технология проведения выработки представлена как обслуживание заявок за шаг проходки комплектом оборудования с жесткой последовательностью операций, каждая из которых выполняется за случайное время. Для формализации концептуальной модели использован математический аппарат систем массового обслуживания (СМО).

Разработаны модели роботизированных технологий проведения горных выработок в виде замкнутых многоканальных многофазных СМО, где заявками являются моменты готовности оборудования к следующему циклу. Обслуживание заявок заключается в их задержке на время выполнения процессов проходческого цикла в приборах, имитирующих соответствующее оборудование. Продолжительность процессов технологического цикла отображается вводом случайных временных задержек в приборы СМО.

В реальных условиях оборудование может начинать выполнение очередного проходческого цикла после завершения предыдущего цикла, причем промежуток времени между началом и окончанием проходческого цикла зависит от случайных факторов. Эта особенность отображается в модели вводом обратной связи, посредством которой очередная заявка поступает на вход СМО

\* Работа, представленная в статье, выполнялась при поддержке РФФИ р\_сибирь\_a (проект 13-07-98023 «Разработка и моделирование безлюдных технологий подземной добычи твердых полезных ископаемых»).

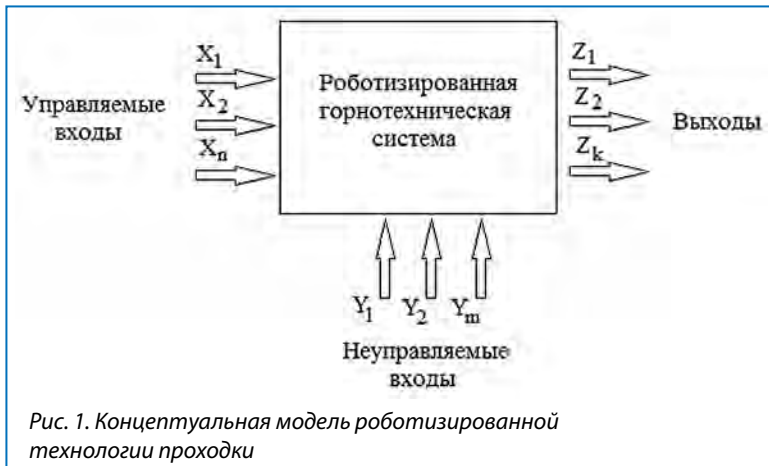


Рис. 1. Концептуальная модель роботизированной технологии проходки

после появления обслуженной заявки на выходе системы. Таким образом, обратная связь формирует входной поток заявок. Скорость поступления заявок равна скорости их обслуживания, поэтому очередь на входе в систему не образуется, и задачи исследования сводятся к оценке общего времени обслуживания заявки и степени использования оборудования.

Средняя продолжительность проходческого цикла определяется в модели как сумма случайных значений времени обслуживания заявки приборами, имитирующими оборудование для разрушения горного массива, погрузки горной массы и крепления выработанного пространства.

Роботизированная технология проведения выработки буровзрывным способом при помощи индивидуальных машин и проходческого комплекса отображается двухканальной многофазной замкнутой системой массового обслуживания, а технологии проходки комбайном избирательного действия и винтоповоротным проходчес-

ким агрегатом (щитовой способ) описываются двухкантурной замкнутой сетью двухканальных многофазных систем массового обслуживания. Заявка в моделях представляет собой момент готовности оборудования к следующему проходческому циклу, а приборы — проходческие машины, выполняющие заявки за случайное время; скорость поступления заявок в систему определяется скоростью их обслуживания (рис. 2, 3).

В буровзрывной технологии по одному каналу заявка обслуживается роботизированными бурильными установками, погрузочными машинами и крепеустановщиком (см. рис. 2). По другому каналу выполняются вспомогательные работы. По окончании проходческого цикла обслуженная

заявка фиксируется счетчиком циклов и разрешает поступление необслуженной заявке на вход системы. Время обслуживания заявки приборами представлено в виде функциональных зависимостей:

$$t_p = f(n_{шп}, l_{шп}, P^b, f_k, S, n^b);$$

$$t_n = f(S, f_k, l_{шп}, \eta, P^n, n^n, k_p, V_{o.c.});$$

$$t_k = f(S, l_g, n_k),$$

где:  $t_p, t_n, t_k$  — случайные величины времени разрушения горного массива, погрузки горной массы и крепления выработки;  $S$  — сечение выработки;  $f_k$  — коэффициент крепости пород;  $n_{шп}$  — количество шпуров за цикл;  $l_{шп}$  — длина шпуров;  $\eta$  — коэффициент использования шпуров;  $k_p$  — коэффициент разрыхления породы;  $P^b, P^n$  — производительность бурильных и погрузочных машин;  $n^b, n^n$  — количество бурильных и погрузочных машин;  $V_{o.c.}$  — объем откаточного средства;  $l_g$  — длина выработки, закрепляемая в течение одного цикла;  $n_k$  — количество проходчиков, занятых возведением крепи.

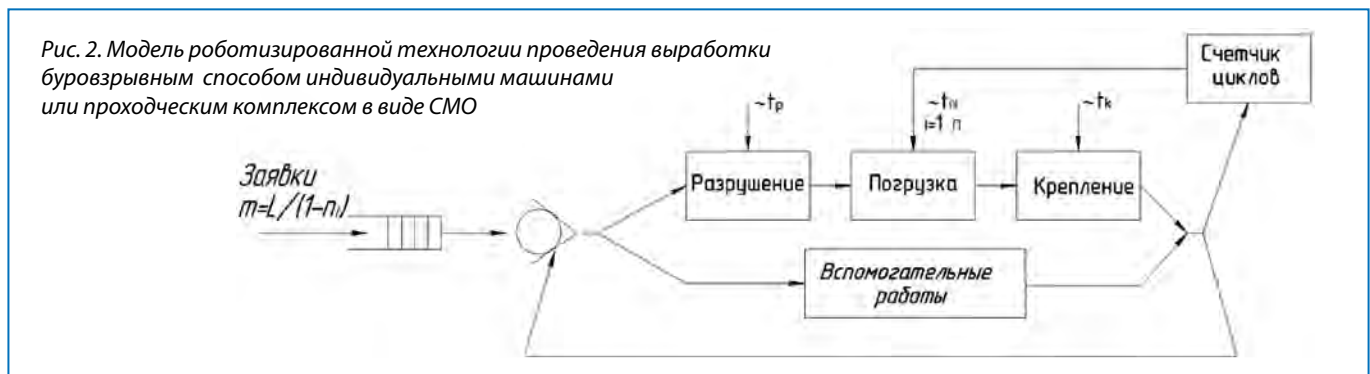


Рис. 2. Модель роботизированной технологии проведения выработки буровзрывным способом индивидуальными машинами или проходческим комплексом в виде СМО

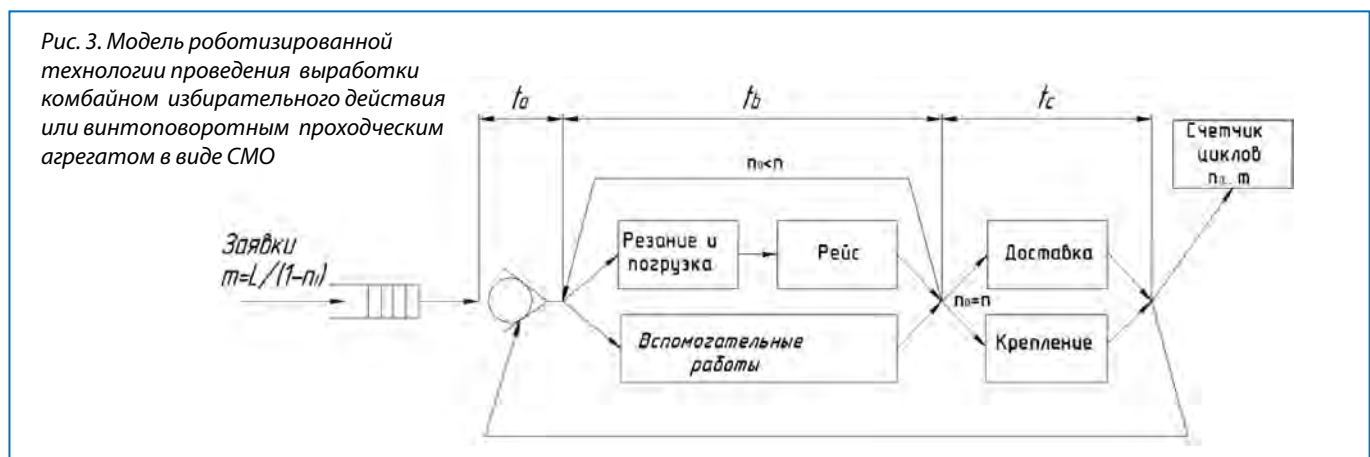


Рис. 3. Модель роботизированной технологии проведения выработки комбайном избирательного действия или винтоповоротным проходческим агрегатом в виде СМО

Модуль «резание с погрузкой»

Модуль	Технологическая интерпретация	Блок-схема	Параметры модели
1. Резание с погрузкой	1 — определить количество рейсов откаточного средства; 2 — подгон откаточного средства; 3 — включение комбайна; 4 — выемка; 5 — выключение комбайна; 6 — отгон откаточного средства; 7 — все рейсы сделаны, если нет, перейти к новому рейсу		$n = Q_{зм} / V_{o.c.}$ $t_{n.a.} = L / v_{o.c.}$ $t_g = (T_g I S_{np}) / n_n$ $t_{o.e.} = L / v_{o.c.}$

$S_{np}$  — сечение выработки в проходке;  $Q_{зм}$  — объем отделенной горной массы;  $n$  — количество требуемых рейсов откаточного средства по вывозу отделенной горной массы;  $t_{n.a.}$  — продолжительность подгона откаточного средства;  $v_{o.c.}$  — скорость движения откаточного средства по выработке;  $t_g$  — продолжительность выемки;  $T_g$  — трудоемкость выемки;  $t_{o.e.}$  — продолжительность отгона откаточного средства

В модели, отображающей роботизированные технологии проведения выработки комбайном или винтоповоротным проходческим агрегатом, заявки последовательно проходят через две связанные СМО (см. рис. 3).

Первая СМО состоит из приборов, имитирующих проходческий комбайн или агрегат, откаточное средство и оборудование для наращивания коммуникаций, а вторая — из приборов, имитирующих работу крепеовозводящего механизма и оборудования для доставки материалов. Обслуживание заявки первой СМО осуществляется в течение случайного времени  $b = f(n_n, R, f_k, V_{o.c.})$ , где:  $n_n$  — количество проходчиков;  $R$  — производительность комбайна.

Заявка покидает эту СМО после соблюдения неравенства:  $n_0 < n$ , где  $n_0$  — число сделанных рейсов откаточного средства;  $n = V/Q$  — число рейсов, требуемое для вывоза всей отделенной горной массы ( $V$  — объем отделенной горной массы;  $Q$  — объем откаточного средства). При выполнении условия  $n = n_0$  заявка поступает на вход второй СМО. Через время  $c = f(S, f_k)$  заявка считается выполненной. Счетчик циклов фиксирует очередной цикл, после чего разрешается поступление следующей заявки на вход сети СМО. Интервал поступления заявок  $a$  равен времени обслуживания заявки обеими СМО  $a = (b + c)$ .

В качестве средства программной реализации моделей технологий проведения горных выработок в наибольшей степени подходит язык GPSS World, поскольку в настоящее время он является одним из самых эффективных и распространенных программных средств моделирования сложных дискретных систем на ЭВМ и успешно используется для моделирования процессов горных работ, формализуемых в виде систем массового обслуживания [1, 3].

Основу GPSS World составляет — имитатор (моделирующая часть). Он выполняет следующие функции:

- обеспечивает заданные программистом маршруты продвижения динамических объектов, называемых транзактами;

- планирует события, происходящие в модели, путем регистрации времени наступления каждого события и выполнения их в нарастающей временной последовательности;
- регистрирует статистическую информацию о функционировании модели;
- продвигает модельное время в процессе моделирования системы.

В GPSS World имеются два основных типа объектов: транзакты и блоки. Блоки задают логику функционирования модели и определяют пути движения транзактов по ней.

Применительно к рассматриваемым объектам моделирования к блокам относятся аналоги приборов СМО, отображающие комбайн, бурильные установки, погрузочные машины, крепеустановщик. Перемещаясь от блока к блоку, транзакты имитируют операции горнопроходческих работ: подгон-отгон бурильных установок, загрузку откаточного средства, крепление выработки и т. п. Транзакты представляют собой аналоги заявок в СМО. Они могут описывать реальные физические объекты, например, электровоз, погрузочную машину, ремонтную бригаду и т. д. Применительно к нашим объектам моделирования транзактами являются заявки на выполнение операций проходческого цикла. В процессе моделирования системы транзакты взаимодействуют с блоками, в результате чего происходят изменения их атрибутов, а также преобразование арифметических или логических значений. Такие преобразования называются событиями.

С использованием GPSS World разработаны типовые программные модули для построения моделей технологий проведения выработок: «резание с погрузкой», «бурение», «заряжание», «погрузка», «крепление». В таблице приведен пример модуля «резание с погрузкой».

Разработанные концептуальные модели с формализацией в виде СМО и последующей программной реализацией на специализированном языке имитационного моделирования GPSS World позволяют путем проведения компьютерных экспериментов выбирать оптимальный объем ковша погрузочно-транспортной машины; определять максимальную длину транспортирования горной

массы при ограничении производительности проходческого цикла; выбирать требуемый объем откаточного средства; оценивать эффективность роботизированных технологий, что в конечном итоге, позволит обосновать эффективную структуру и параметры роботизированных горнотехнических систем.

#### Список литературы

1. Коных В.Л., Зиновьев В.В. Дискретно-событийное моделирование подземных горных работ. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2011. 243 с.

2. Система математического управления крепью (САУК) как средство адаптации крепи к различным горно-геологическим условиям шахт Кузбасса / В.И. Клишин, М. Ройтер, У. Кисслинг, А.О. Вессель // Вестник КузГТУ. 2014. № 1. С. 34-39.

3. Зиновьев В.В. Моделирование многозабойной проходки с использованием имитационного подхода // Институт угля Сибирского отделения РАН // ГИАБ. 2013. № 066 (отдельн. вып.). С. 138-144.

4. Стародубов А.Н., Зиновьев В.В., Дорофеев М.Ю. Моделирование энерготехнологического комплекса по глубокой переработке угля // Уголь. 2010. № 2. С. 8-12.

UDC 519.876.5:622.26 © V.V. Zinoviev, A.N. Starodubov, 2014

ISSN 0041-5790 • UGOL №12-2014 / 1065/

#### Title

DEVELOPMENT DISCRETE-EVENT MODELS ROBOTIC TECHNOLOGY OF MINING

#### Authors

Zinoviev V.V., Starodubov A.N.

#### Authors' Information

**Zinoviev V.V.**, senior research scientist of the Coal institute of SB RAS, ph.d in technical sciences, associate professor, Kemerovo, Russia, tel.: +7(3842)74-10-45

**Starodubov A.N.**, senior research scientist of the Coal institute of SB RAS, ph.d in technical sciences, associate professor, Kemerovo, Russia, tel.: +7(3842)74-10-45, e-mail: a.n.starodubov@gmail.com

#### Abstract

An approach to the construction of a discrete-event models of robotic technology of mining for solving multivariate analysis and choose optimal variant of equipment layout for the design new industries proposed. A simulation model, showing the operation of the major subsystems of mining technology created.

#### Keywords

Mine workings, Equipment layout, Queuing system, Simulation.

#### References

1. Konih V.L. and Zinoviev V.V. Discrete and event simulation of underground mining [Diskretno-sobyitnoye modelirovaniye podzemnykh gornyx rabot].

Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN — Publishing of Siberia department of Russian Academic Sciences, 2011, 243 p.

2. Klislin V.I., Royter M., Kissling U. and Vessel A.O. Mathematical control system for support (MCSS) as a mean of adaptation to different lining mining and geological conditions of Kuzbass mines [Sistema matematicheskogo upravliniya krepki (SAUK) kak sredstvo adaptatsii krepki k razlichnym gorno-geologicheskim usloviyam shaht Kuzbassa]. Vestnik KuzGTU — Vestnik KuzSTU, 2014, №1, pp.34-39.

3. Zinoviev V.V. Modeling of multi-hole drifting using a simulation approach [Modelirovaniye mnogozaboynoy prohodki s ispolzovaniem imitatsionnogo podhoda]. Institut ugliya Sibirskogo otdeleniya RAN — Coal Institute of Siberia department of Russian Academic Sciences. GIAB — Mining Information Analytical Bulletin, 2013, №6 (sep. issue), pp.138-144.

4. Starobubov A.N., Zinoviev V.V. and Dorofeev M.Y. Modeling in energetochnologicheskogo kompleksa po glubokoy pererabotke uglia]. Ugol-Coal, 2010, №2, C.8-12.

## СУЭК названа лучшим оператором железнодорожных путей необщего пользования



ОАО «СУЭК» стала лауреатом премии «Партнер ОАО «Российские железные дороги» в номинации «Лучшая организация — владелец железнодорожных путей необщего пользования» в 2014 г. Об этом было объявлено в рамках награждения победителей премии 27 октября.

В торжественной церемонии приняли участие руководители профильных министерств и ведомств, в том числе президент ОАО «РЖД» Владимир Якунин, заместитель председателя Комитета по экономической политике Совета Федерации Федерального Собрания РФ Сергей Шатилов, руководитель Федеральной службы по тарифам Сергей Новиков, топ-менеджеры отечественных и иностранных компаний — партнеров РЖД.

Приз за победу в номинации лучшей компании — владельца железнодорожных путей необщего пользования заместителю генерального директора, директору по логистике ОАО «СУЭК» Денису Илатовскому вручил первый вице-президент ОАО «РЖД» Вадим Морозов.

«СУЭК является крупнейшим грузоотправителем в сети РЖД, объем отгрузки по железной дороге в 2014 г. составил более 80 млн т. Для обеспечения отгрузки с угледобывающих предприятий под управлением СУЭК находятся пути необщего пользования протяженностью 785,4 км и

парк локомотивов — 196 ед. СУЭК также управляет парком полувагонов — 22000 шт., в том числе около 6000 из них — инновационные вагоны, — отметил **Денис Илатовский**. — Для нашей компании успешное взаимодействие с РЖД является важнейшим условием экономической эффективности наших предприятий. Мы чрезвычайно благодарны руководству РЖД за высокую оценку уровня нашего сотрудничества. За прошедший год нам совместно удалось решить ряд очень сложных задач. Например, значительно выросла скорость доставки наших грузов — на 11%. Усовершенствованы технологии управления вагонными парками в Ванино и Мурманске, что позволило увеличить суточную переработку на припортовых станциях до 850 и 600 вагонов соответственно. Доля маршрутных отправок СУЭК выросла в 2014 г. на 10 % от уровня 2013 г. СУЭК также принимала активное участие в экспертном обосновании необходимости развития Восточного полигона РЖД».

Премия «Партнер ОАО «РЖД»» учреждена с целью совершенствования взаимодействия с промышленными и транспортными компаниями, имеющими партнерские отношения с ОАО «РЖД», дальнейшего сотрудничества с другими участниками перевозок, улучшения имиджа железнодорожного транспорта.