«GORNYI ZHURNAL», 2017, № 2, pp. 79–82
DOI: 10.17580/gzh.2017.02.15

Bottom-up approach to modeling power use in a coal mine

Information about author

A. G. Zakharova¹, Professor, Doctor of Engineering Sciences, zaharova8@gmail.com

¹ Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

Abstract

The author proposes to predict electric energy consumption in a coal mine using the bottom-up flow modeling based on the hierarchy of constituents. At the top of the model hierarchy is a 'system' (coal mine) composed of lower scale objects or 'subsystems' (ensemble of mining equipment grouped based on a certain criterion, e.g. mining equipment of extraction panels, mining equipment of permanent roadways, etc.). The state of the object 'system' is described with a set of characteristics which assign admissible states for each 'subsystem'. Each object 'subsystem' is composed of the objects of the next lower level of the hierarchy, and the state of each 'subsystem' is described with a set of characteristics which assign states for that lower level objects named 'members' (cutter-loaders, conveyors, main mine drainage pumps, reloaders, etc.).

This problem is solved using one of the most promising methods for the numerical modeling of random processes – direct simulation Monte Carlo method. Mining equipment is a system possessing finite number of states, and each simulation of evolution of states uses the method of probabilistic automata to generate transitions between the states according to a certain pre-set rule.

Using the Microsoft Solutions Framework, the programmable solution is constructed for the numerical modeling of the Markov processes of a system evolution under random impacts and is implemented as a stand-alone application for Windows XP based on Microsoft Visual Basic 10.0.

The test of the programmable solution using an exactly solvable model of a machine operating cycle has shown that the resultant current average values obtained to an accuracy not higher than 11% offer sufficient information on distribution of probabilities for the analyzed parameters of the system.

The energy consumption regularities found for individual members, subsystems and the system – mine as a whole using the proposed model are applicable to solving problems of energy efficiency improvement both in the stage of mine design and under normal operation.

Keywords: coal mine, energy consumption, bottom-up approach, Monte Carlo method, Markov processes, energy characteristics.

References

1. Vasilev D. A., Ivashchenko V. A., Lukyanov D. V. Forecast of active loads of industrial enterprises on the basis of sample identification. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2011. No. 3-4. pp. 122–126.
2. Kazarinov L. S., Barbasova T. A., Kolesnikova O. V., Zakharova A. A. Method of industrial enterprise's power consumption forecasting. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komputernye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*. 2014. Vol. 14, No. 1. pp. 5–13.
3. Gabov V. V., Zadkov D. A. Energy-saving modular units for selective coal cutting. *Eurasian Mining*. 2016. No. 1. pp. 37–40. DOI: 10.17580/em.2016.01.06
4. Sinchuk O. N., Guzun E. S., Parkhomenko R. A., Rozen V. P. Methods of calculation of electric power loads on mining companies. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2013. No. 8. pp. 104–110.
5. Val P. V., Popov Yu. P. Concept of development of the forecasting system of industrial enterprise's power consumption in wholesale market conditions. *Promyshlennaya energetika*. 2011. No. 10. pp. 31–35.
6. Zakharova A. G. Regularities of power consumption on Kuzbass coal mines : thesis of inauguration of Dissertation ... of Doctor of Engineering Sciences. Kemerovo, 2006. 34 p.
7. Bogdanoff G., Kozin F. Probabilistic Models for Cumulative Damage. Translated from English. Moscow : Mir, 1989. 344 p.
8. Lantukh-Lyashchenko A. I. Refined estimate and researches of strain-stress state of beam during bend. *Nauka i progress transporta*. 2010. No. 33. pp. 150–154.
9. Uzagaliev Z. A. Probabilistic model of damage accumulation in the polymer high voltage insulation. *Vestnik Kyrgyzskogo-Rossiyskogo Slavyanskogo universiteta*. 2015. Vol. 15, No. 9. pp. 156–159.
10. Barash L. Yu., Shchur L. N. PRAND: GPU accelerated parallel random number generation library: Using most reliable algorithms and applying parallelism of modern GPUs and CPUs. *Computer Physics Communications*. 2014. Vol. 185, No. 4. pp. 1343–1353.
11. Gould H., Tobochnik J. Computer simulation in physics. Translated from English. In two volumes. Moscow : Mir, 1990. Volume 2. 398 p.
12. Barash L. Yu., Shchur L. N. RNGSELIB: Program library for random number generation. More generators, parallel streams of random numbers and Fortran compatibility. *Computer Physics Communications*. 2013. Vol. 184, No. 10. pp. 2367–2369.
13. Stickler B., Schachinger E. Basic concepts in computational physics. 2nd edition. Switzerland : Springer International Publishing, 2016. 412 p.
14. Newman M. Computational physics. North Charleston : CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012. 562 p.

УДК 622.233.05:621.3

АВТОМАТИЗАЦИЯ ШАРОШЕЧНОГО БУРЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН НА КАРЬЕРАХ

А. О. ШИГИН, доцент, д-р техн. наук, shigin27@rambler.ru

А. В. ГИЛЁВ, проф., д-р техн. наук

А. А. ШИГИНА, аспирант

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Введение

Буровая техника на карьерах России представлена в основном станками шарошечного бурения (до 95 % всего парка). Это обусловлено технологией разработки месторождений открытым способом и необходимостью бурения сетки взрывных скважин с последующим подрывом массива горных пород. При этом удельный вес буровых работ в общей стоимости добычи полезного ископаемого достигает 30 % и более [1].

Необходимость создания дистанционно управляемых или автономных шарошечных буровых станков возникла по причине высокой вредности и опасности условий труда. Для эффективного дистанционного управления бурением необходим специальный технический комплекс, учитывающий особенности работы станка и бурового инструмента. При бурении массивов горных пород, характеризующихся сложной структурой, требуется постоянная корректировка режимных параметров. Таким образом, при отработке карьера бурение должно быть интеллектуализированным.

Ключевые слова: автономный буровой станок, интеллектуальная система бурения, бурение сложноструктурных массивов горных пород, адаптивный вращательно-подающий механизм.

DOI: 10.17580/gzh.2017.02.16

© Шигин А. О., Гилёв А. В., Шигина А. А., 2017

Длительное время конструкции станков шарошечного бурения отечественных и зарубежных производителей не модернизировались. Все изменения были направлены, как правило, на улучшение эргономики, механизацию и автоматизацию некоторых промежуточных операций [2, 3]. Основные процессы, связанные непосредственно с бурением скважины, в настоящее время не автоматизированы.

Необходимость создания дистанционно управляемых или автономных шарошечных буровых станков возникла по причине высоких рисков для персонала при работе в карьере. В частности, на карьерах АК «АЛРОСА» в связи с особенностью строения кимберлитовых трубок экономически нецелесообразно проектировать широкие уступы. В таких карьерах уступы, как правило, формируются узкими площадками, и велика опасность их обрушения [4]. По мере углубления карьера площадки уступов еще больше сужаются. При этом экономическая эффективность разработки месторождения карьерами остается высокой по сравнению с подземным способом. Однако при опасности обрушения разработка месторождения не может быть осуществлена, так как на нижних горизонтах находятся люди и рабочая техника.

Эту проблему можно решить созданием дистанционно управляемых горных машин [5]. Например, отечественная компания ОАО «ВИСТ Групп» осуществляет внедрение систем автоматического управления самосвалами и буровыми станками (рис. 1). В связи с развитием современных технологий стало возможным использовать в горной технике высокоточную спутниковую навигацию, позволяющую в динамике устанавливать местоположение машин и отдельных их частей с дециметровой точностью, а также определять ориентацию с точностью до десятых долей градуса [6].

В декабре 2012 г. в ОАО «Олкон» компания «ВИСТ Групп» завершила внедрение автоматизированной системы управления буровыми станками СБШ-250МНА на основе высокоточной навигации ГЛОНАСС/GPS «VG Drill». При управлении буровым станком с помощью данной системы учитывается заранее полученная информация о массиве горной породы. Однако она не

может быть достаточно точной для конкретной скважины, а дается приближенно для блока горной породы. Поэтому данная система не позволяет избежать непрогнозируемых ударных нагрузок и вибрации.

Методы автоматизации управления режимными параметрами бурения

Для создания буровых станков, которые позволяют выполнять весь цикл необходимых операций без присутствия людей в карьере, недостаточно вывести дистанционное управление механизмами станка на удаленный пульт. При бурении массивов горных пород, характеризующихся колебанием физико-механических свойств по глубине, часто возникают значительные ударные нагрузки и вибрация, что требует постоянной корректировки режимных параметров [7]. При этом маркшейдерские карты, литологический разрез и выведенные на приборной панели данные не дают какой-либо целостной картины о характере буримого массива горной породы.

В настоящее время в горной промышленности применяются буровые станки с различными типами вращательно-подающих механизмов. Их особенности характеризуются величиной усилия подачи, частотой вращения бурового става и т. д. При этом управление основными технологическими параметрами осуществляется вручную. В частности, усилие подачи машинист регулирует дросселем в гидросистеме на основе изменения величины тока в обмотке двигателя вращателя, давления в гидросистеме, визуального наблюдения и уровня вибрации. Поэтому для создания простейшей системы дистанционного управления бурением требуется дооснащение бурового станка вибро- и видеоаппаратурой для получения более полной информации. При этом остается необходимость закрепления за каждым буровым станком персонального машиниста. Модернизация сложной буровой техники требует комплексных конструкторских решений, связанных со значительными финансовыми затратами.

В стоимости проходки 1 м скважины расходы на шарошечные долота составляют 60–70 %. При этом более 80 % случаев от-

Рис. 1. Схема автоматизации буровзрывных работ на основе высокоточной спутниковой навигации

казов приходится на разрушение опор качения шарошек буровых долот [8]. Таким образом, повышение эффективности бурения непосредственно связано с увеличением ресурса шарошечных долот. При бурении сложноструктурных и трещиноватых масси-

Рис. 2. Зависимости скорости бурения от осевого усилия при различной потребляемой мощности электромагнитного механизма подачи рабочего органа

Рис. 3. Кинематическая схема вращательно-подающего механизма станка СБШ-250МНА-32 с адаптивным элементом-датчиком:

1 — электродвигатель постоянного тока; 2 — редуктор вращателя; 3 — муфта; 4 — опорный узел с электромагнитной опорой (адаптивным элементом-датчиком); 5 — четырехкратная канатно-полиспастовая система подачи; 6 — колонна вращающихся штанг; 7 — гидроцилиндр подачи; 8 — механизм свинчивания-развинчивания штанг

вов горных пород часто возникают значительные ударные нагрузки и вибрация, результатом которых является увеличение циклических напряжений во всем буровом станке [9]. В отличие от циклических нагрузок, проявляющихся при взаимодействии зубьев шарошки с поверхностью забоя, значительно больше непрогнозируемых ударных нагрузок, возникающих при прохождении трещин и других неоднородных включений и несплошностей. Из анализа наработок на отказ шарошечных долот следует вывод о значительном снижении их стойкости (до двух раз) в случае бурения породы со сложной структурой. Своевременное регулирование режимных параметров и адаптивное снижение непрогнозируемых ударных нагрузок позволяют приблизить ресурс шарошечных долот к величине, соответствующей его работе при бурении горного массива без нарушений сплошности и однородности [10].

С учетом необходимых требований техническая реализация дистанционно управляемого или автономного бурового станка связана с применением интеллектуальной системы управления [11, 12]. В отличие от простейшей автоматической системы с заранее заданными действиями и их характером, интеллектуальная система управления включает подсистему, которая постоянно осуществляет мониторинг физико-механических характеристик массива горных пород и определяет необходимость и величину изменения режимных параметров бурового станка. Подсистема мониторинга характеристик массива в процессе бурения должна включать адаптивный элемент-датчик, связанный непосредственно с рабочим органом бурового станка. Это устройство должно принимать на себя динамическую нагрузку, смягчая реакцию опоры со стороны сложноструктурной породы, а также быстро и своевременно фиксировать изменение свойств буримого материала и позволять корректировать режимные параметры, используя обратные связи для силовых органов.

Элемент-датчик может иметь два варианта исполнения. В первом варианте буровой станок должен быть оснащен адаптивным механизмом подачи рабочего органа. Во втором варианте исполнения элемент-датчик может быть представлен в виде электромагнитной опоры, размещенной в механической цепи бурового органа между вращателем и буровым ставом.

В адаптивном механизме подачи рабочего органа бурового станка осуществляется при помощи линейного асинхронного трехфазного двигателя [12]. За счет исключения промежуточных механических элементов в данном приводе все внезапные удары при прохождении долотом трещин и других структурных нарушений массива преобразуются в колебания тока в обмотке статора и смягчаются электромагнитной связью.

В результате лабораторных исследований с использованием разработанной расчетной методики получены расчетно-экспериментальные механические характеристики для вращательно-подающих механизмов буровых станков (рис. 2) [10]. Как видно, потребляемая мощность данного привода значительно меньше суммарной мощности гидронасосов привода подачи бурового станка СБШ-250МНА-32, которая составляет около 60 кВт.

При снижении линейной скорости бурового става вследствие увеличения крепости или прохождения трещины усилие подачи

возрастает, перемещая точку рабочего режима на верхней ниспадающей ветке механической характеристики в сторону увеличения линейной скорости. Применение адаптивного механизма позволяет смягчать удары и быстро получать информацию об изменении свойств породы, что необходимо для работы интеллектуальной системы управления бурением.

В процессе бурения адаптивный электромагнитный привод без значительной задержки (всего 0,01 с) реагирует на отклонение показателя буримости соответственным изменением величины тока в обмотке статора. Изменение тока фиксируется напрямую с обмотки двигателя. В автоматическом режиме, согласно заложенной в контроллере функции, предполагается изменение режима бурения. Изменяются усилие и скорость подачи, а также момент на валу вращательного механизма и частота вращения бурового става. Регулировка режимов возможна двумя способами: изменением схемы коммутации обмоток двигателя, сконструированного с необходимыми характеристиками, или ослаблением напряжения для уменьшения жесткости механической характеристики двигателя и смягчения ударных нагрузок. Комплексное использование указанных способов позволит своевременно изменять режимные параметры бурения.

Применение адаптивного элемента-датчика в виде электромагнитной опоры значительно более простая задача, поскольку достаточно разместить в механической цепи бурового органа между вращателем и буровым ставом электромагнитный упорный подшипник, рассчитанный на максимальное усилие подачи. Такая опора подвешивает вал в управляемом магнитном поле, обеспечивая бесконтактное вращение. В процессе бурения внутреннее кольцо упорного подшипника, жестко связанное с буровым ставом, перемещается относительно внешнего кольца со статорной обмоткой. Под действием отклонений осевой нагрузки в электромагнитном подшипнике изменяется магнитный зазор. За счет этого одновременно сглаживаются непрогнозируемые ударные нагрузки и меняется ток в статорной обмотке. Электромагнитная опора позволяет эффективно и своевременно получать информацию о колебаниях физико-механических характеристик горной породы, но при этом снижаются адаптивные свойства, позволяющие сглаживать ударные нагрузки и вибрацию. Кинематическая схема вращательно-подающего механизма станка СБШ-250МН-32 с адаптивным элементом-датчиком показана на **рис. 3**.

Значение тока и величина его изменения в сочетании с данными о скорости бурения, усилии подачи и частоте вращения является обратным сигналом для интеллектуальной системы управления бурением. Такой комплексный обратный сигнал является предоставленной в неявном виде информацией о физико-механических характеристиках массива горной породы, буримой в данный момент времени. При анализе комплексных обратных сигналов, полученных в предыдущие моменты времени, могут быть получены сведения об изменениях характеристик породы. Для предоставления информации в явном виде, обработки и получения задающего корректирующего воздействия необходимо использовать четко формализованные расчетные методики [10].

Рис. 4. Принципиальная схема интеллектуальной системы управления бурением

С помощью данных методик и получаемой информации определяются текущие усилие подачи, частота вращения бурового става, прочностные и структурные характеристики массива горных пород. Принципиальная схема интеллектуальной системы управления представлена на **рис. 4**.

Заключение

Информационный блок интеллектуальной системы необходимо обрабатывать при помощи компьютера, рассчитывая корректировки режимных параметров, которые в автоматическом режиме изменяются на данную величину. На приборной панели должны отображаться текущие значения режимных параметров бурения, характеристики массива буримых пород. В виде дополнительной информации может отображаться текущее расчетное значение остаточного ресурса долота, оптимальные значения параметров бурения, экономические показатели работы бурового станка и др. Реализация интеллектуальной системы на базе буровых станков отечественного или зарубежного производства в сочетании с уже существующими системами навигации и позиционирования позволяет создать полностью автономную машину, работа которой может дистанционно контролироваться индивидуально или комплексно.

Библиографический список

1. Буткин В. Д., Нехорошев Д. Б. Выбор типомodelей и рациональная эксплуатация шарошечных долот на карьерах : учеб. пособие. – Красноярск : Государственный университет цветных металлов и золота, 2006. – 84 с.
2. Белинкин А. А., Решетняк С. П., Пипчак В. С., Перевозчиков Е. Л., Каира В. Е. Основные аспекты создания нового универсального бурового станка «УГМК-Рудгормаш» // Горная промышленность. 2009. № 1(83). С. 46–50.
3. Каинов А. И., Красиков В. Д. Организация высокопроизводительной работы бурового станка Pit Viper на ОАО «Разрез Тугнуйский» // Уголь. 2013. № 1(1042). С. 6–8.
4. Пивень Г. Ф. Обоснование условий эффективного перехода от открытых горных работ к подземным при комбинированной разработке кимберлитовых трубок : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2012. – 45 с.
5. Tianyou C., Hong W., Qin S. J., Tongwen C., Sirish L. S. Guest editorial integrated optimization of industrial automation // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2014. Vol. 11. No. 4. P. 963–964.
6. Клебанов Д. А., Макеев М. А. Современное состояние и перспективы развития систем управления горно-транспортными комплексами на горнодобывающих предприятиях Украины // Горная промышленность. 2011. Спец. выпуск. С. 106–108.

7. Chapman C. D., Flores J. L. S., Perez R. D. L., Yu H. IADC/SPE 151736 Automated Closed-loop Drilling with ROP Optimization Algorithm Significantly Reduces Drilling Time and Improves Downhole Tool Reliability // Proceedings of the IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 6–8 March 2012. Vol. 2. – California : Curran Associates, Inc., 2012. P. 1323–1330.
8. Техника, технология и опыт бурения скважин на карьерах / под ред. В. А. Перетолчина. – М. : Недра, 1993. – 286 с.
9. Хан Г. Н. Моделирование методом дискретных элементов динамического разрушения горной породы // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 1. С. 110–117.
10. Shigina A. A., Shigin A. O., Stupina A. A., Kurchin G. S., Kirsanov A. K. Model of rock drilling process in terms of roller cone bit remaining life // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. No. 19. P. 9792–9799.
11. Stupina A. A., Shigina A. A., Shigin A. O., Karaseva M. V., Ezhemanskaja S. N. Automated intellectual system with the short-duration nature of feedback // Life Science Journal. 2014. Vol. 11. No. 8s. P. 302–306.
12. Шигин А. О. Адаптивный вращательно-подающий механизм бурового станка для снижения непрогнозируемых нагрузок при бурении сложноструктурных пород // Горный журнал. 2013. № 7. С. 79–83.

ГЖ

«GORNYI ZHURNAL», 2017, № 2, pp. 82–86
DOI: 10.17580/gzh.2017.02.16

Automation of rotary blasthole drilling in open pit mines

Information about authors

A. O. Shigin¹, Associate Professor, Doctor of Engineering Sciences, shigin27@rambler.ru

A. V. Gilyov¹, Professor, Doctor of Engineering Sciences

A. A. Shigina¹, Post-Graduate Student

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract

In Russia and abroad the main volume of drilling in open pit mines is performed by rotary drilling rigs. The article highlights the lack in the technology and equipment of rotary drilling, including the methods to optimize control over basic parameters of the process. The importance of drilling process automation, down to creation of unmanned technologies, is conditioned by a rapid rate of growth in production output and a higher personnel risk in mining under increasingly complicated operating conditions both for the machine and the operator. The need to create the remote-controlled or autonomous rotary drilling rigs is caused by the highly hazardous working conditions. The effective remote control of drilling requires a special technical system taking into account the peculiarities of the machine and drilling tools. Drilling in complex-structure rock masses requires continuous adjustment of operating parameters. Thus, drilling in open pit mines should be intellectualized. The article indicates the need to use adaptable rotary feeders in combination with the monitoring system for the structure and strength characteristics of rocks in the array of intelligent control of rotary drilling. It is proposed to use an adaptable sensor with the quick feedback and adaptable damping function. The problem of uncertainty of rock properties is proposed to be handled by monitoring the changes in the rock properties and by implementing stepwise adjustments of drilling parameters using the developed calculation methods.

Keywords: self-contained drilling rig, intelligent drilling system, complex-structure rock mass drilling, adaptable rotary feed mechanism.

References

1. Butkin V. D., Nekhoroshev D. B. The choice of type models and rational exploitation of rolling cutter bits on open pits : tutorial. Krasnoyarsk : Gosudarstvennyy universitet tsvetnykh metallov i zlota, 2006. 84 p.
2. Belinkin A. A., Reshetnyak S. P., Pipchak V. S., Perevozchikov E. L., Kaira V. E. Main Aspects in Creating a New General-Purpose Drilling Rig for Open-Pit Mining. *Gornaya promyshlennost*. 2009. No. 1(83). pp. 46–50.
3. Kainov A. I., Krasikov V. D. Organization of a High Performance Operation of Pit Viper Boring Rig at "Tugnuysky" Open-pit Mine. *Ugol*. 2013. No. 1(1042). pp. 6–8.
4. Piven G. F. Condition substantiation of efficient transition from open cast to underground mining during the combined mining of kimberlite pipes : thesis of inauguration of Dissertation ... of Doctor of Engineering Sciences. Moscow, 2012. 45 p.
5. Tianyou C., Hong W., Qin S. J., Tongwen C., Sirish L. S. Guest editorial integrated optimization of industrial automation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2014. Vol. 11, No. 4. pp. 963–964.
6. Klebanov D. A., Makeev M. A. Modern state and development prospects of the systems of management of mining-transport complexes on Ukrainian mining enterprises. *Gornaya promyshlennost*. 2011. Special Issue. pp. 106–108.
7. Chapman C. D., Flores J. L. S., Perez R. D. L., Yu H. IADC/SPE 151736 Automated Closed-loop Drilling with ROP Optimization Algorithm Significantly Reduces Drilling Time and Improves Downhole Tool Reliability. *Proceedings of the IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 6–8 March 2012*. Vol. 2. California : Curran Associates, Inc., 2012. pp. 1323–1330.
8. Technics, technology and experience of well drilling on pits. Ed.: V. A. Peretolchin. Moscow : Nedra, 1993. 286 p.
9. Khan G. N. Discrete element modeling of rock failure dynamics. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2012. No. 1. pp. 110–117.
10. Shigina A. A., Shigin A. O., Stupina A. A., Kurchin G. S., Kirsanov A. K. Model of rock drilling process in terms of roller cone bit remaining life. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016. Vol. 11, No. 19. pp. 9792–9799.
11. Stupina A. A., Shigina A. A., Shigin A. O., Karaseva M. V., Ezhemanskaja S. N. Automated intellectual system with the short-duration nature of feedback. *Life Science Journal*. 2014. Vol. 11, No. 8s. pp. 302–306.
12. Shigin A. O. Adaptable rotary-feed mechanism of rock drilling machine for reduction of unpredictable loads in complicated-structure rock drilling. *Gornyi Zhurnal*. 2013. No. 7. pp. 79–83.