

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2016, № 11, pp. 89–93
DOI: dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.17

Improvement of mineral mining and processing control: Review and special program support

Information about authors

A. A. Ershov¹, Deputy Head of a sector of Automatic Control System Department, Candidate of Engineering Sciences, A_Ershov@rivs.ru

E. A. Isaev¹, Head of a sector of Automatic Control System Department

¹ IVS Joint Venture, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

As the tool of enhancing efficiency of mining and processing flow control, the article addresses the automatic systems belonging in the class of Advanced Process Control (APC). A brief description and examples of products are given for the actually applied APC techniques and technologies in mining and processing, functions of application software Klever developed by RIVS are presented, and potential efficiency of this product introduction is estimated.

The implementation of Klever software makes it possible to maintain qualitative and quantitative indexes of performance of a processing plant and to minimize human factor impact in the production control. As a result, economic efficiency of mining and processing enhances due to more complete extraction of metals and owing to optimized cost of processing plant personnel.

Keywords: APC systems, mining and processing industry, program support, Klever software, screen image.

References

1. Sbárbaro D., René del Villar. *Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants*. Daniel Sbárbaro. London: Springer, 2010. 310 p.

2. Remes A. *Advanced Process Monitoring and Control Methods in Mineral Processing Applications*. Espoo: Aalto University, 2012. 76 p.
3. Hodouin D. Methods for automatic control, observation, and optimization in mineral processing plants. *Journal of Process Control*. 2011. Vol. 21, Iss. 2. pp. 211–225.
4. Mielli F. *Advanced Process Control and Mineral Processing Applications*. Schneider Electric. Available at: <http://blog.schneider-electric.com/mining-metals-minerals/2014/05/29/advanced-process-control-mineral-processing-applications/> (accessed: 28.04.2016).
5. Ershov A. A. Method and evaluation of efficiency for intellectualization of control systems development for complex industrial-technical systems. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013. No. 1. Available at: <http://www.science-education.ru/107-8430> (accessed: 26.08.2016).
6. Fomin Ya. A. *Pattern classification: theory and applications*. Second edition. Moscow: FAZIS, 2012. 429 p.
7. Doroganov V. S. Intellectual information system of charge preparation for the required-quality coke production. *Modern problems of coke production and coking product processing: collection of reports of the II All-Russian scientific-practical conference*. Kemerovo: Kuzbass State Technical University, 2014. pp. 58–59.
8. Advanced process control for the minerals industry. *FLSmidth*. Available at: <http://www.flsmidth.com/DFA0DED8-BE66-4620-BD96-DE706E02C2A4> (accessed: 28.04.2016).
9. Shean B. J. A review of froth flotation control. B. J. Shean, J. J. Cilliers. *International Journal of Mineral Processing*. 2011. Vol. 100, Iss. 3–4. pp. 57–71.
10. Brian Flintoff. Refining Metso mineral processing technologies. *Gornaya Promyshlennost*. 2012. No. 5(105). p. 24.
11. cpmPlus Expert Optimizer Advanced optimization for your industry. Available at: https://library.e.abb.com/public/a3004e27e4286e52c12576be0038ce06/cpmPlus_Exp_Opt_3BHS%20291766_lr.pdf (accessed: 05.05.2016).
12. Zimin A. V., Trushin A. A., Bondarenko A. V. Vector of development of means and systems of automation for mining-concentration productions at Scientific and Production Association "RIVS". *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 11. pp. 91–95.

УДК 004.896:622.7.012

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СИТУАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. А. ТРУШИН¹, директор департамента АСУ, канд. техн. наук,
A_Trushin@rivs.ru

¹ СП ЗАО «ИВС», Санкт-Петербург, Россия

Введение

Одной из наиболее сложных технических проблем, возникающих при внедрении автоматизированных систем управления технологическими процессами, является автоматизация процедуры формирования управляющих воздействий, обеспечивающих достижение технологических показателей, соответствующих некоторым заданным критериям эффективности. Многократные попытки решения такого рода задачи, заканчивавшиеся достижением в той или иной мере положительных результатов, имели специфическое применение и не привели к созданию универсального инструмента, позволяющего успешно справляться с вышеуказанной задачей.

В настоящей работе изложен один из возможных подходов к реализации режима автоматического управления сложными технологическими объектами управления — применение принципа ситуационного контроля. Метод претендует на универсальность и эффек-

Рассмотрен один из реализуемых с помощью современных технических средств возможных подходов к решению задач управления технологическими процессами обогащения — принцип ситуационного управления.

Основная идея — применение формальных методов, позволяющих осуществить накопление информации, способствующей достижению наилучших результатов в процессе переработки конкретных технологических сортов руд данного месторождения, а также извлечение режимных значений управляющих воздействий, обеспечивших наилучшие показатели в прошлом при переработке аналогичных руд.

Приведен пример создания новых технических средств, способствующих реализации рассматриваемого метода управления.

Ключевые слова: технологические процессы обогащения, экспертные системы, алгоритмы управления, ситуационный контроль, технические средства автоматизации, автоматизация технологических исследований.

DOI: dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.18

тивность решения задачи автоматического управления различными технологическими процессами обогатительного производства.

**Ситуационный контроль
в режимах автоматического управления**

Основная идея реализации принципа ситуационного контроля для управления заключается в применении формальных приемов, позволяющих осуществить накопление информации, способствующей достижению наилучших результатов в процессе переработки конкретных технологических сортов руд данного месторождения, а также извлечение режимных значений управляющих воздействий, обеспечивших наилучшие показатели в прошлом при переработке аналогичных руд.

Разрабатываемый принцип относится к группе методов (нейронные сети, нечеткая логика [1–7]), обеспечивающих приемлемое (необязательно оптимальное) качество управления в условиях неопределенности, путем реализации попыток формализации действий человека при принятии решений. Преимуществом нашего подхода является принятие обоснованных решений, эффективность которых подкрепляется практикой их применения в прошлом, в отличие от упомянутых принципов управления, основанных на интуиции или субъективной оценке ожидаемых результатов.

Математический аппарат, лежащий в основе реализации принципа ситуационного управления, разработан проф. В. А. Вороновым [8]. Принцип ситуационного управления предполагает выбор управляющих воздействий на основании информации о текущей ситуации на объекте управления, характеризующейся совокупностью контролируемых переменных с использованием соответствующей модели. Все контролируемые переменные имеют числовую природу, измеряются количественно, и текущая ситуация может быть представлена числовым вектором. В связи с большой размерностью векторов, описывающих сложные технологические объекты управления, и возникающими в связи с этим трудностями вычисления при работе с огромными массивами данных возникает насущная необходимость существенно уменьшения размерности такого рода векторов без потери информации об объекте. Возможный вариант решения данной задачи — это переход от векторного представления информации к скалярному, т. е. преобразование описания ситуации совокупностью чисел к адекватному ее представлению всего одним числом. При этом важным обстоятельством является тот факт, что преобразование позволяет построить процедуру моделирования, являющуюся в определенной степени альтернативой регрессионным методам.

Методика, позволяющая представить технологическую ситуацию в виде целочисленного скаляра (названная В. А. Вороновым ks -преобразованием), заключается в следующем.

Пусть i -я ситуация на объекте описывается вектором:

$$\vec{Xmi} = (X1i, X2i, \dots, Xmi, \dots, Xni), \tag{1}$$

где Xmi — контролируемые параметры процесса; $i = 1, 2, 3, \dots, n$ — порядковый номер ситуации; $m = 1, 2, 3, \dots, n$ — порядковый номер контролируемого параметра; n — число контролируемых параметров.

Если разбить полный диапазон изменения каждого параметра на заданное число интервалов дискретности и пронумеровать полученные поддиапазоны каждого параметра в направлении от нижней границы к верхней, то конкретное значение любого параметра может быть представлено номером поддиапазона, в который он попадает.

В этом случае равенство (1) может быть представлено в виде

$$\vec{jmi} = (j1i, j2i, \dots, jmi, \dots, jni), \tag{2}$$

где jmi — номер поддиапазона, в который попадает значение параметра Xm .

Если принять для удобства вычислений число интервалов или поддиапазонов, равное 10, то вектор ситуации можно представить в виде числа, получаемого из выражения

$$\vec{jmi} = \sum_{m=1}^n jmi \cdot 10^{n-m}. \tag{3}$$

Рассмотренный вариант ks -преобразования существенно упрощает построение алгоритмов управления. Дополнительным достоинством данного метода является возможность решения некоторых прикладных задач. В частности, автором данный принцип преобразования использован для решения задачи распознавания технологических сортов руд. Подобное решение проиллюстрировано на примере идентификации руды Артемьевского месторождения Республики Казахстан (рис. 1).

Используя принятую систему преобразования для диапазонов наблюдаемых колебаний компонентов химического состава руды, %: 30–60 SiO_2 ; 1–10 Al_2O_3 ; 0,5–5 CaO; 0,5–5 MgO; 0,5–5 K; 0,5–5 Na; 0,5–5 Cu; 1–10 Zn; 0,5–5 Pb; 5–15 $S_{общ}$; 5–15 $S_{сульфидн}$; 5–15 $Fe_{общ}$; 0,01–0,1 As; 0,01–0,1 Sb; 0,01–0,1 Cd, параметры технологического сорта руды для состава, приведенного на рис. 1, записываются в виде скалярной величины:

$$\vec{jmi} = 871331342222413. \tag{4}$$

Оценку близости текущего сорта руды к наблюдававшемуся ранее при данном подходе осуществляют путем арифметического суммирования разностей модулей каждого из разрядов скалярных величин, характеризующих их химические составы. Для близких по составу руд эта разница стремится к нулю.

В отличие от известных подходов к оценке сортности руды по ограниченному числу основных параметров [9, 10], разработанный принцип позволяет учесть несравненно большее число контролируемых компонентов, что существенно повышает точность идентификации сортов руд, поступающих на переработку.

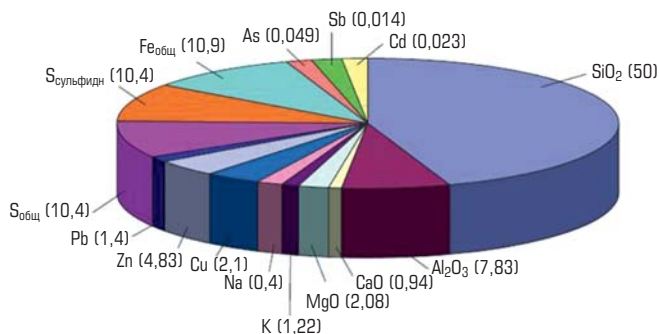


Рис. 1. Химический состав пробы, % руды Артемьевского месторождения (Республика Казахстан)

Принцип ks-преобразования применяется автором и для шифрования ситуаций, характеризующих текущее состояние объекта управления, а наличие возможности кодирования технологических сортов руды позволяет разрабатывать алгоритмы управления, автоматически адаптирующиеся к изменению свойств перерабатываемого сырья.

Применительно к переделу измельчения задача управления решается следующим образом.

Задается критерий эффективности работы измельчительных агрегатов, например содержанием контрольного класса крупности в готовом продукте при заданной производительности по исходной руде.

Определяется массив контролируемых переменных, характеризующих ситуацию, соответствующую текущим условиям эксплуатации агрегата. В отличие от общепринятого набора контролируемых параметров (производительность по исходной руде, расход воды, плотность продуктов и т. п.), в данном случае дополнительно используются такие параметры, как крупность руды, подаваемой в мельницы, состояние шаровой загрузки, износ футеровки, песковых насадок, рабочих колес перекачивающих насосов (в % от максимального ресурса) и т. д.

Задается набор управляющих воздействий (производительность по исходной руде, плотность сливов классифицирующих аппаратов, расход воды в соответствующие точки агрегатов, давление пульпы в питании гидроциклонов).

В течение периода времени, длительность которого определяется опытным путем для каждого конкретного объекта управления, осуществляется обучение системы. В процессе обучения фиксируются технологические сорта перерабатываемых руд, ситуации, описывающие состояние объектов управления, и величины управляющих воздействий, обеспечивавшие достижение желаемого результата работы. Полученные данные заносятся в архив системы управления. Объем архива на этапе обучения ограничивается некоторым предельным числом N наблюдаемых ситуаций. Число N для каждого объекта задается индивидуально с учетом скорости дрейфа вещественного состава перерабатываемых руд.

В дальнейшем осуществляется «скользящее» во времени обновление массивов данных по мере поступления новой информации, что позволяет отслеживать влияние на эффективность процесса измельчения медленно развивающихся факторов, длительность изменения которых превышает период, соответствующий отрезку времени формирования архива.

После завершения процесса обучения в режиме «работа» осуществляется автоматическая оценка технологических сортов перерабатываемой руды, а также ситуаций, характеризующих работу агрегатов, и извлекаются из архива значения управляющих воздействий, которые в прошлом при переработке аналогичных сортов руды в подобных технологических условиях обеспечивали достижение заданных критериев эффективности.

Подход к осуществлению принципа ситуационного управления применительно к процессу флотации ранее был описан в статье [11].

Преобразование векторного представления информации в скалярную величину также нашло применение и при разработке автоматизированной системы технолога-исследователя АСУ ТИ. Назна-



Рис. 2. Автоматизированная система технолога-исследователя АСУ ТИ на базе лабораторных флотомашин ФМЛ-30

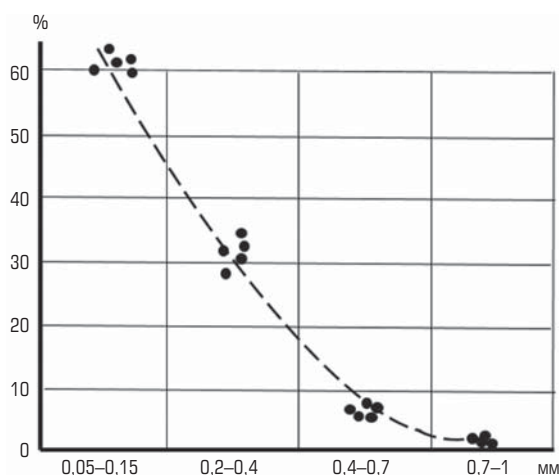


Рис. 3. Градуировочная характеристика гранулометра ГПП-РИФ

чением системы является автоматизация процессов сбора, обработки информации и управление режимами работы лабораторных флотомашин при выполнении исследовательских работ.

Основой для создания автоматизированной системы послужили лабораторные флотомашин серии ФМЛ (рис. 2), обладающие по сравнению с известными техническими средствами (например, лабораторной флотомашинной FT100XL компании Retsh [12]) более высоким уровнем автоматизации.

Результаты разработки служат основой формирования научно-технической базы знаний при внедрении алгоритмов автоматического управления процессами флотации в зависимости от сортности перерабатываемых руд в промышленном масштабе.

АСУ ТИ обеспечивает реализацию следующих функций:

- управление режимами работы флотомашин, включая регулирование скорости вращения импеллера, скорости пеносъема, расхода воздуха на аэрацию, дозирование реагентов;

- формирование временных циклов работы флотомашин по заданию технолога-исследователя;
- архивацию информации, сопутствующей проведению экспериментов, в том числе вводимый вручную исходный химический и минеральный состав исследуемой пробы, а также промежуточные результаты, получаемые в процессе проведения опытов;
- кодирование технологического сорта исследуемой пробы руды, расчет технологических показателей, получаемых в процессе проведения опытов;
- формирование рецептурной карты, содержащей информацию о технологическом сорте исследуемой руды и режимах, обеспечивающих получение наилучших технологических показателей.

В качестве интерфейса для связи с АСУ ТИ могут быть использованы встроенные в корпус флотомашин операторские панели или АРМ технолога-исследователя.

Очевидно, что эффективность информационных систем и систем автоматического управления, разработанных на основе применения принципов ситуационного контроля, возрастает с увеличением числа контролируемых параметров, вовлекаемых в оценку ситуаций, характеризующих состояние объектов управления. В связи с этим нами ведется постоянная работа по созданию новых технических средств, высокий научно-технический уровень которых подтвержден патентами РФ.

Индикатор крупности руды ИКР-РИФ, работающий по принципу обработки сигнала лазерного уровнемера, сканирующего поверхность движущегося потока руды. В отличие от известной дорогостоящей системы SIMINE MAQ [13], позволяющей получить 3D-модель потока руды, индикатор ИКР-РИФ представляет собой недорогое устройство контроля, которое в режиме «меньше—норма—выше» может сигнализировать о выходе контрольного класса крупности за установленные границы, что вполне приемлемо для диагностирования таких событий, как прорыв сеток грохотов, чрезмерный износ разгрузочных щелей дробилок и т. п. Индикатор позволяет контролировать изменение характеристик гранулометрического состава руды в диапазоне 5–300 мм. Испытания макета в лабораторных условиях подтвердили правильность реализованных в установке принципиальных решений.

Гранулометр для контроля распределения классов крупности твердой фазы пульповых продуктов ГПП-РИФ. Принцип работы гранулометра основан на механическом «ощупывании» потока пульпы чувствительным элементом. В качестве последнего в приборе применен электронный микрометр производства японской фирмы Omron. В отличие от известного устройства ПИК-074, в состав гранулометра ГПП-РИФ входит система отбора и подготовки пробы, обеспечивающая подачу для анализа практически монофазной твердой фазы пульпы, что позволяет измерять частички в диапазоне флота-

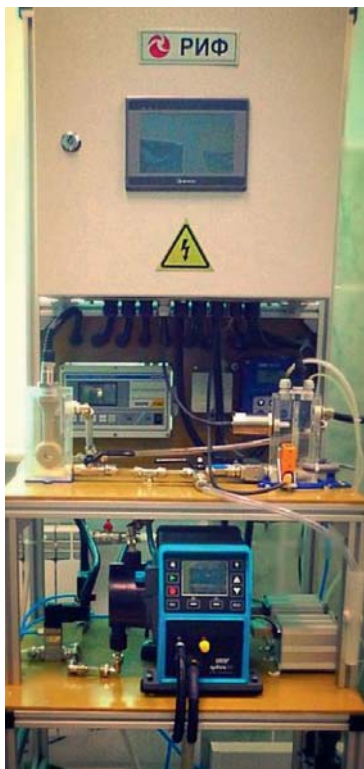


Рис. 4. Устройство автоматического контроля физико-химических компонентов жидкой фазы пульпы ККП-РИФ

ционной крупности от нескольких десятков микрон до 1–2 мм. Промышленные испытания гранулометра на Николаевской обогатительной фабрике подтвердили приемлемую точность работы прибора (рис. 3). Известный зарубежный аналог — лазерный гранулометр Outotec PSI® 500i [14] отличается гораздо более высокими сложностью и стоимостью, что существенно ограничивает возможности его практического применения.

Плотномер-расходомер пульповых продуктов ПРП-РИФ. В основу работы устройства заложен известный принцип определения скорости потока среды посредством расчета корреляционной зависимости между физическими свойствами, например плотностью сечений потока, расположенных на некотором расстоянии L друг от друга. Корреляция возникает вследствие того, что элементарный объем потока с определенными физическими свойствами перемещается на расстояние L за время τ . Следовательно, по максимуму взаимно корреляционной функции могут быть найдены величина τ и, соответственно, скорость потока. Отличием данной разработки от известных решений является то, что плотность пульпы в элементарных сечениях определяется по перепаду гидростатического давления на восходящем участке трубопровода. Данное свойство прибора позволяет контролировать плотность, а значит, и расход твердого в аэрированных пульпах, что имеет особенно большое значение для контроля расхода продуктов в обогатительном производстве. Стендовые испытания устройства подтвердили его работоспособность и эффективность.

Устройство автоматического контроля физико-химических компонентов жидкой фазы пульпы ККП-РИФ. Устройство предназначено для осуществления контроля концентрации компонентов в фильтрате пульпы путем воспроизведения процедур, выполняемых при титриметрическом анализе. В его состав входят пробозаборник, накопительная емкость с фильтр-патроном, перекачивающий насос, измерительная кювета с оптическим индикатором точки эквивалентности, микродозаторы реактивов и управляющий контроллер с панелью оператора (рис. 4).

Одной из важных задач, которую удалось решить с помощью данного устройства — это контроль остаточной концентрации CaO в пульпе. Как известно, простейшим решением при контроле концентрации CaO является измерение проводимости пульпы с помощью кондуктометрического датчика. Однако кондуктометрический принцип измерения зачастую не дает ожидаемого эффекта, так как на проводимость могут влиять и другие компоненты, находящиеся в пульпе. Такими же недостатками обладают, например, зондовые анализаторы фирмы YSI [15].

В настоящее время на базе установки ККП-РИФ на одной из обогатительных фабрик в Республике Казахстан специалистами

НПО «РИВС» ведутся работы по внедрению системы кондиционирования оборотной воды.

Заключение

Рассмотренные в настоящей работе аспекты применения методов ситуационного контроля являются иллюстрацией одного из

возможных подходов к внедрению информационных систем и систем автоматического управления технологическими процессами обогащения. Для окончательного понимания преимуществ предлагаемого метода требуется длительная кропотливая работа по его реализации на производственных площадках и в исследовательских лабораториях.

Библиографический список

1. *Rassel C., Norvig P.* Искусственный интеллект: современный подход. — 2-е изд.: пер. с англ. — М.: Вильямс, 2006. — 1408 с.
2. *Ozyildirim B. M., Avci M.* Generalized classifier neural network // *Neural Networks*. 2013. Vol. 39. P. 18–26.
3. *Виноградов Г. П.* Методы и алгоритмы принятия решений в автоматизированных системах управления производствами с непрерывной технологией на основе субъективных представлений: монография. — Тверь: ТГТУ, 2013. — 256 с.
4. *Виноградов Г. П.* Моделирование управления развивающимися системами // Тр. Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT 12»: научное издание в 4 т. — М.: Физматлит, 2012. Т. 2. С. 74–81.
5. *Sivaraman S., Joshi S. R., Maharana S.* PLC Implementation of Supervisory Control for a Dynamic Power Flow Controller using a Modular Approach: A Project Report. — National Institute of Technology Rourkela, 2011. — 52 с.
6. *Dorner M. G.* Algorithm for transforming models of business processes into monochrome Petri nets // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2011. Vol. 7(45). P. 460–468.
7. *Zhukov V., Sharikov Y., Turunen I.* Modeling of Gold Leaching with Thiosulphate Solutions in Different Types of Reactor // 23rd European Symposium on Computer Aided Engineering. — Elsevier, 2013. P. 1045–1050.
8. *Воронов В. А.* Многоуровневая оптимизация процессов обогащения. — М.: Недра, 1991. — 154 с.
9. *Морозов В. В., Топчаев В. П., Улитенко К. Я., Ганбаатар З., Дэлгэрбат Л.* Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых. — М.: ИД «Руда и Металлы». 2013. — 512 с.
10. *Морозов В. В., Авдохин В. М., Ганбаатар З., Дэлгэрбат Л., Улитенко К. Я.* Управление процессами рудоподготовки и обогащения на основе непрерывного анализа сортности руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. Отдельный выпуск № 1. Труды международного научного симпозиума «Неделя горняка-2012». С. 569–583.
11. *Зимин А. В., Трушин А. А., Бондаренко А. В.* Вектор развития средств и систем автоматизации для горно-обогажительных производств в НПО «РИВС» // Горный журнал. 2014. № 11. С. 91–95.
12. Тестер флотации FT 100 XL / Retsch. [website]. URL: <http://www.retsch.ru/products/assisting/testing/ft-100-xl/information-downloads/> (дата обращения: 14.10.2016).
13. Completely Integrated Solutions for the Mining Industry. SIMINE Pellet — Siemens. URL: <http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industriesolutions/mining/simine/en/SIMINE-Pellet-en.pdf> (дата обращения: 14.10.2016).
14. Outotec PSI® 500i. Advanced on-line slurry particle size. URL: http://www.outotec.com/ImageVaultFiles/id_954/d_1/cf_2/OTE_Outotec_PSI_ (дата обращения: 14.10.2016).
15. Industrial Pretreatment Made More Efficient. URL: <https://www.ysi.com/File%20Library/Documents/Application%20Notes/AS01-Industrial-Pretreatment-Made-More-Efficient-with-YSI-Technology.pdf> (дата обращения: 14.10.2016). **ИЖ**

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2016, № 11, pp. 93–97
DOI: [dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.18](https://doi.org/10.17580/gzh.2016.11.18)

Application of situational control methods in processing

Information about authors

A. A. Trushin¹, Director of Automatic Control System Department, Candidate of Engineering Sciences, A_Trushin@rivs.ru

¹ IVS Joint Venture, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The article is focused on an approach to mineral processing control using modern technologies—situational control.

The keynote idea is the use of formal methods, making it possible to accumulate information on reaching the best results in processing of specific ore grades at a given deposit, and to find standard variables of control actions, which ensured the best processing performance on the same grade ore in the times past. An advantage of the described approach, as against the known solutions on expert systems, is making of reasoned decisions the efficiency of which is confirmed by the earlier case records.

The author presents a procedure of transforming vector of characteristics of a control object into a scalar value, which considerably simplifies computation based on enormous databases without the loss of information on the object.

The article gives examples of application of the procedure in coding of process grades of ore and in construction of processing control algorithms.

A brief review of new automation devices designed by RIVS Science and Production is given.

Keywords: processing operations, expert systems, control algorithms, situational control, automation devices, production research automation.

References

1. Stuart J. Russel, Peter Norvig. Artificial Intelligence: A Modern Approach. Second edition. Translated from English. Moscow: Vilyams, 2006. 1408 p.
2. Ozyildirim B. M., Avci M. Generalized classifier neural network. *Neural Networks*. 2013. Vol. 39. pp. 18–26.
3. Vinogradov G. P. *Methods and algorithms of decision-making in process control systems with continuous*

technology on the basis of subjective ideas: monograph. Tver: Tver State Technical University, 2013. 256 p.

4. Vinogradov G. P. Developed systems management modeling. *Proceedings of the Intellectual System and Information Technology Congress «IS&IT 12»: tutorial in 4 volumes.* Moscow: Fizmatlit, 2012. Vol. 2. pp. 74–81.
5. Sivaraman S., Joshi S. R., Maharana S. *PLC Implementation of Supervisory Control for a Dynamic Power Flow Controller using a Modular Approach: A Project Report.* National Institute of Technology Rourkela, 2011. 52 p.
6. Dorner M. G. Algorithm for transforming models of business processes into monochrome Petri nets. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2011. Vol. 7(45). pp. 460–468.
7. Zhukov V., Sharikov Y., Turunen I. Modeling of Gold Leaching with Thiosulphate Solutions in Different Types of Reactor. *23rd European Symposium on Computer Aided Process Engineering.* Elsevier, 2013. pp. 1045–1050.
8. Voronov V. A. Multi-level optimization of concentration processes. Moscow: Nedra, 1991. 154 p.
9. Morozov V. V., Topchaev V. P., Ulitenko K. Ya., Ganbaatar Z., Delgerbat L. Development and application of mineral dressing process control systems. Moscow: «Ore and Metals» Publishing House, 2013. 512 p.
10. Morozov V. V., Avdokhin V. M., Ganbaatar Z., Delgerbat L., Ulitenko K. Ya. Management of ore preparation and concentration processes on the basis of constant ore grade quality analysis. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten.* 2012. *Special issue No. 1. Proceedings of International Scientific Symposium «Miner's week-2012».* pp. 569–583.
11. Zimin A. V., Trushin A. A., Bondarenko A. V. Vector of development of means and systems of automation for mining-concentration productions at Scientific and Production Association "RIVS". *Gornyi Zhurnal.* 2014. No. 11. pp. 91–95.
12. Flotation Tester FT 100 XL. *Retsch.* Available at: <http://www.retsch.ru/products/assisting/testing/ft-100-xl/information-downloads/> (accessed: 14.10.2016). (in Russian)
13. Completely Integrated Solutions for the Mining Industry. *SIMINE Pellet* — Siemens. Available at: <http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industriesolutions/mining/simine/en/SIMINE-Pellet-en.pdf> (accessed: 14.10.2016).
14. Outotec PSI® 500i. Advanced on-line slurry particle size. Available at: http://www.outotec.com/ImageVaultFiles/id_954/d_1/cf_2/OTE_Outotec_PSI_ (accessed: 14.10.2016).
15. Industrial Pretreatment Made More Efficient. Available at: <https://www.ysi.com/File%20Library/Documents/Application%20Notes/AS01-Industrial-Pretreatment-Made-More-Efficient-with-YSI-Technology.pdf> (accessed: 14.10.2016).