

Автоматизация рентгенолюминесцентных сепараторов алмазов

Сергей Авдеев, Евгений Владимиров, Владимир Морозов, Татьяна Романовская

Рассмотрены вопросы автоматизации рентгенолюминесцентных сепараторов алмазосодержащих руд. Особое внимание в статье уделено анализу сигналов на основе аналого-цифрового преобразования и мониторингу состояния сепараторов в АСУ ТП.

ВВЕДЕНИЕ

Добыча алмазов уже много лет является эффективной отраслью промышленности нашей страны. Сегодня основные предприятия алмазодобывающего комплекса сосредоточены в северных районах республики Саха-Якутия.

Уже с 60-х годов прошлого столетия, когда началось промышленное освоение месторождений, технология обогащения алмазосодержащей руды базировалась на использовании явления люминесценции (излучения видимого света) некоторыми минералами, в том числе и алмазами, под воздействием рентгеновского излучения (рентгенолюминесценции). Этот метод показал себя достаточно эффективным и экологически относительно безопасным. Построенные для его реализации отечественные установки получили название рентгенолюминесцентных сепараторов (РЛС). В настоящее время комплексы РЛС (рис. 1), созданные на Санкт-Петербургском научно-производственном предприятии «Буревестник», работают на всех обогатительных фабриках страны. Условия эксплуатации сепараторов достаточно сложные: круглосуточный режим функционирования, диапазон рабочих температур $+10...+50^{\circ}\text{C}$, технологическая вода с щелочной реакцией. Весьма высоки и требования к основным па-



Карьер Удачный

раметрам: производительность до 100 тонн в час при извлечении до 98-99% алмазов.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СЕПАРАТОРА

Принцип действия РЛС поясняет рис. 2.

Алмазосодержащая руда проходит непрерывно (до нескольких десятков тонн в час) под потоком излучения, создаваемого рентгеновской трубкой. Рентгеновская трубка (РТ) возбуждается от источника высокого напряжения, работающего в импульсном режиме. Возникающие сигналы люминесценции фиксируются фотоумножителями

(ФЭУ), усиливаются и анализируются на принадлежность к обогащаемому минералу в устройстве регистрации. В случае когда зарегистрированный сигнал принадлежит алмазу, соответствующая часть руды отделяется («отсекается») от основного потока в концентрат с помощью пневмомеханических устройств с электромагнитным управлением. Остальная руда уходит в «хвосты», то есть в отвалы, или на дополнительную переработку.

В реальном сепараторе облучение материала осуществляется обычно двумя рентгеновскими трубками, поток может быть разделен на несколько «ручьев», а число фотоприемников и каналов регистрации доходит до 8. Взаимодействие между подсистемами сепаратора, синхронизацию и контроль их функционирования выполняет блок управления. В первых РЛС



Рис. 1. Очередная партия готовых сепараторов во время испытаний в цехе предприятия

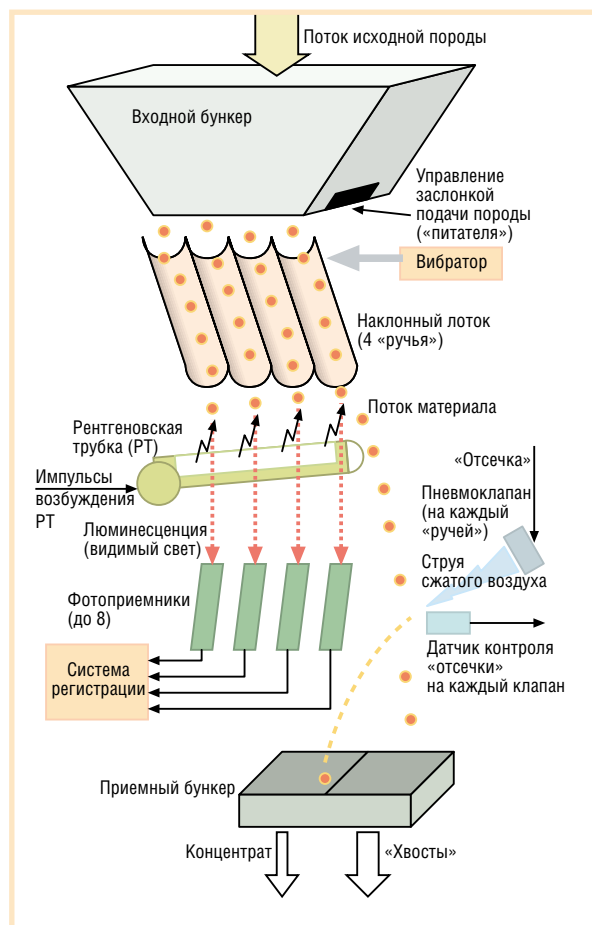


Рис. 2. Структурная схема, поясняющая принцип действия сепаратора (количество рентгеновских трубок — одна или две, число «ручьев» и, соответственно, фотоприемников и исполнительных пневмоклапанов — 2, 4 или 8)

этот блок был автоматом с жесткой логикой, в современных — это программируемый микропроцессорный блок.

Помимо алмазов свойствам рентгенолюминесценции обладают и другие сопутствующие минералы. Способность сепаратора выделять сигнал от алмазов на фоне шумов и сигналов от сопутствующих мешающих минералов (селективность) определяется правильной установкой критериев отбора. Реализация процесса отбора осложняется высокой ценностью обогащаемого минерала (требуется, как уже отмечалось, извлечь не менее 98-99% алмазов, имеющихся в исходном материале) и малым временем, отводимым на анализ. Реально это время составляет несколько миллисекунд. По этой причине анализ сигналов люминесценции на соответствие критериям отбора осуществлялся до последнего времени аналоговыми схемами. Недостаток такой реализации — жесткая установка параметров и фиксированный набор методик разделения алмазов и «пустой» породы.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

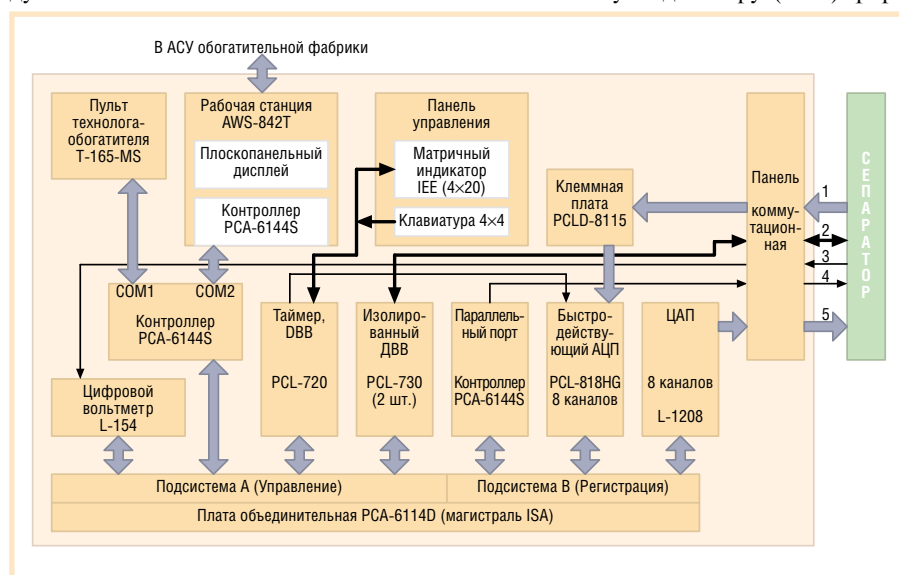
Появившиеся в последние годы на рынке новые программируемые технические средства позволили по-иному взглянуть на построение системы автоматизации сепаратора и на возможность реализации новых функций управления с помощью высоконадежных программируемых контроллеров. С учетом необходимого быстродействия, а также исходя из доступности, цены, надежности и соответствия условиям эксплуатации, в качестве базы были выбраны IBM PC совместимые устройства фирмы Advantech. Применение быстродействующего АЦП позволило реализовать на этой базе и управление, и регистрацию, которая включает анализ и отбор сигналов люминесценции, базирующийся на выделении различных характеристик сигнала люминесценции и определении соотношений между ними.

На рис. 3 представлена структурная схема блока управления и регистрации — центрального блока системы управления РЛС. Блок выполнен как двухмашинная система, все модули которой размещены на единой пассивной объединительной плате PCA-6114D с двумя независимыми магистралями ISA и общим блоком питания. Каждая подсистема имеет отдельный контроллер PCA-6144S с процессором Am 5x86/133, ОЗУ — 4 Мбайт SIMM и твердотельным диском (SSD) на трех микросхемах AT49C040A — системным аналогом гибкого магнитного диска. В подсистему каждого контроллера входят функциональные модули, управляемые по шине ISA. Обе подсистемы взаимодействуют между собой и с оконечными устройствами сепаратора через порты модулей.

Подсистема управления содержит следующие модули:

PCL-720 — задатчик импульсных последовательностей для синхронизации возбуждения источника излучения и подсистемы регистрации;

PCL-730 (2 шт.) — платы ввода сигналов датчиков, требующих гальванической развязки (уровни, не совместимые с ТТЛ), и вывода сигналов управления, в том числе сигналов повышенной мощности и напряжения; ТТЛ совместимые каналы модулей PCL-730 подключены к системному дисплею — символьному индикатору (4×20) фир-



Условные обозначения:

ДВВ — дискретный ввод-вывод; 1 — аналоговые сигналы от фотоприемников (2, 4 или 8 каналов в зависимости от типа РЛС); 2 — дискретные сигналы управления оконечными блоками и устройствами РЛС и сигналы датчиков; 3 — вспомогательные параметры блоков РЛС (аналоговые величины, подлежащие численному контролю); 4 — импульсные последовательности для синхронизации возбуждения источника излучения и подсистемы регистрации; 5 — аналоговые сигналы автоматической регулировки усиления (APV).

Рис. 3. Структурная схема блока управления и регистрации

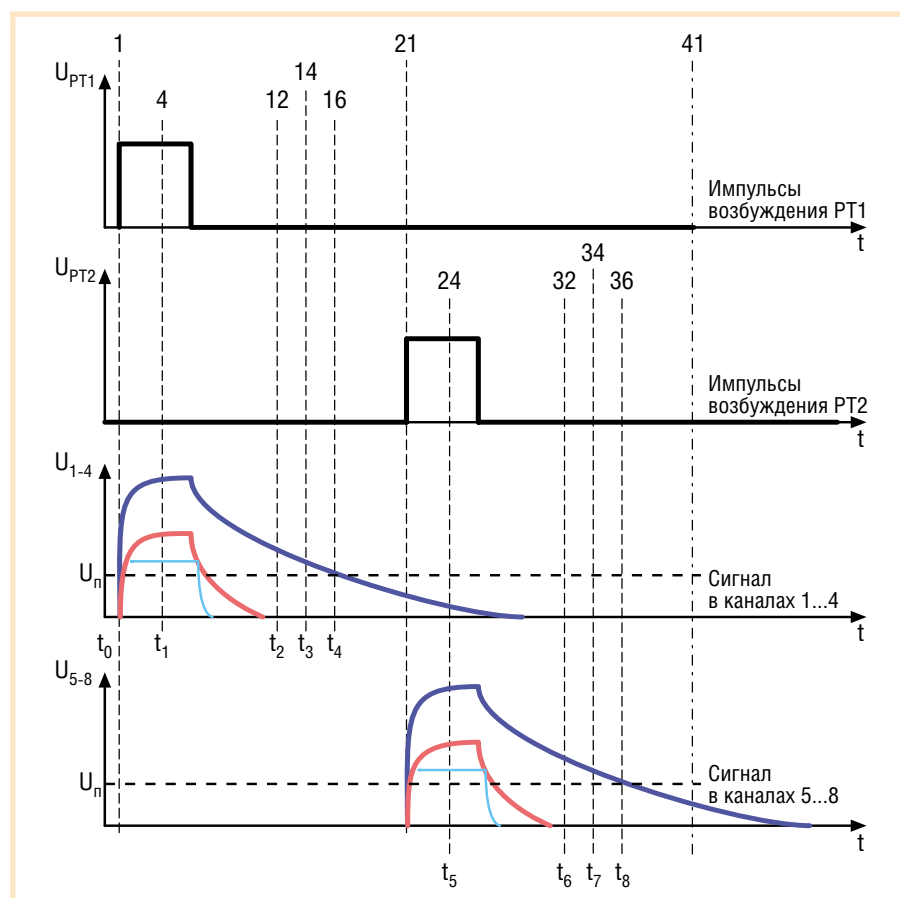


Рис. 4. Временные диаграммы сигналов (синим цветом показан сигнал люминесценции алмаза, красным — сигнал сопутствующих минералов, голубым — сигнал люминесценции воздуха; U_n — напряжение порога разделения)

мы ИЕЕ, блоку матричной клавиатуры, блоку джамперов для коммутации системных опций и тестов;

L-154 — многоканальный цифровой вольтметр («Л-Кард»).

Кроме того, в подсистему регистрации входят модули 8-канального быстродействующего АЦП PCL-818HG и 8-канального ЦАП L-1208.

Подсистема регистрации

Организация работы подсистемы регистрации в реальном времени оказалась нетривиальной задачей. Дело в том, что, исходя из технических требований на сепаратор, возбуждение источника рентгеновского излучения производится импульсами с периодом 4 мс. Поскольку в сепараторе обычно имеются две рентгеновские трубки, работающие со сдвигом во времени на полпериода и облучающие до 4 отдельных потоков каждая, то на обслуживание каждой группы из 4 каналов регистрации приходится всего 2 мс. На рис. 4 приведены временные диаграммы сигналов, поясняющие работу подсистемы регистрации.

Для синхронизации подсистемы используется кварцевый генератор с частотой 10 кГц, размещенный в модуле

PCL-720. Синхросигнал вызывает прерывания процессора подсистемы регистрации с периодом, соответственно, 100 мкс. Весь цикл возбуждения 2 рентгеновских трубок, регистрации откликов и анализа последних на принадлежность обогащаемому минералу — алмазу — разбит на 40 тактов, образующих временную сетку процесса.

Пусть условно первый такт начинается с установки сигнала возбуждения первой рентгеновской трубки, тогда на 6-м такте этот сигнал снимается; аналогично на 21 и 26-м тактах устанавливается и снимается сигнал возбуждения для второй рентгеновской трубки. На 4, 12, 14 и 16-м тактах, а также соответственно на 24, 32, 34 и 36-м тактах запускается аналого-цифровой преобразователь (АЦП) модуля PCL-818HG. Соответствующие значения времени обозначены на диаграммах как $t_1...t_8$. При значениях $t_1...t_4$ выполняется преобразование для каналов 1...4, а в точках $t_5...t_8$ — для каналов 5...8. Каждому обозначенному значению времени, таким образом, соответствуют четыре 12-разрядных числа, представляющих собой значения напряжения сигнала люминесценции в указанном канале на определенном шаге временной сетки.

Сигналы в каналах, полученные во время действия импульсов возбуждения (t_1 и t_5), соответствуют суперпозиции сигналов люминесценции воздуха в зоне облучения, который присутствует вне зависимости от наличия люминесцирующих минералов, и так называемого короткоживущего компонента сигналов люминесценции минералов (когда они присутствуют в этой зоне). Короткоживущий («быстрый») компонент (БК) возникает практически мгновенно после начала импульса возбуждения и гаснет сразу же по его окончании. Остается так называемый долгоживущий («медленный») компонент (МК) сигнала, который гаснет в течение нескольких миллисекунд. Амплитуда БК, амплитуда и длительность МК служат основными характеристиками сигнала люминесценции, по которым выявляется его принадлежность к обогащаемому минералу — алмазу.

Соотношения, положенные в основу селекции

Полагая МК экспонентой вида

$$U = U_0 \cdot e^{-t/\tau},$$

где U_0 — амплитуда МК,

t — текущее время,

τ — постоянная времени экспоненты,

можно определить параметры МК по результатам измерений в тактах 12, 14, 16, (32, 34, 36):

$$\tau = \Delta t \cdot U / \Delta U, \Delta U = U_2 - U_3, \Delta t = t_3 - t_2$$

Здесь U_2 и U_3 — значения напряжения сигнала, измеренные в тактах 12 и 14 соответственно (моменты времени t_2 и t_3).

В тактах 32, 34, 36 проводятся аналогичные измерения для другой группы каналов.

Исследования показали, что алмазы отличаются от сопутствующих минералов определенным диапазоном соотношений амплитуд БК и МК и диапазоном значений постоянной времени сигналов люминесценции. Сравнение полученного сигнала с заданным этими параметрами «образом» алмаза производит процессор подсистемы регистрации в тактах 17...20 (37...40). В случае положительного результата сравнения по какому-либо каналу в одном из цифровых портов модуля PCL-818HG устанавливается «1» в бите с номером, определяемым номером выявленного канала.

Значения параметров сигнала люминесценции воздуха, измеряемые в моменты времени t_1 и t_5 при отсутствии полезного сигнала, служат для автоматической регулировки коэффициента передачи в каналах регистрации, который является функцией напряжения и тока рентгеновской трубки, коэффициента передачи ФЭУ и уровня загрязнения их входных окон. Эти значения усредняются по массиву реализаций (не менее 1000) и через определенные интервалы времени (здесь — 128 мс) сравниваются с заданным значением. Если текущее среднее значение в некотором канале на момент сравнения меньше заданного более чем на 10%, то выполняется операция усиления с помощью ЦАП, выходное напряжение которого управляет чувствительным элементом — ФЭУ данного канала. Если же, напротив, текущее среднее превышает уставку на 10% или более, то в ЦАП записывается меньшее число с целью снижения усиления ФЭУ. Таким образом эмулируется работа «задержанной» АРУ, независимо функционирующей в каждом из 8 каналов регистрации. Задержка в АРУ обеспечивает устойчивость системы в процессе регулирования. В качестве источников высоковольтного питания ФЭУ в системе использованы маломощные преобразователи типа DC-DC.

Если в процессе работы АРУ содержимое ЦАП в каком-либо канале таково, что соответствующее ему напряжение ФЭУ достигнет верхней допустимой границы (обычно это вызвано загрязнением входного окна ФЭУ частицами обогащаемой руды), регулирование прекращается и в цифровой порт выдается бит потери чувствительности канала. Этот сигнал требует вмешательства оператора.



Подсистема управления Рис. 5. Блок управления с пультом технолога-обогапителя

При реализации подсистема управления оказалась существенно проще подсистемы регистрации, так как в ней не требуется столь быстрой реакции на входные сигналы, хотя общее число каналов ввода-вывода и превышает 100. Можно выделить три основных режима функционирования подсистемы управления:

- циклический опрос органов управления (клавиатуры на панели блока, удаленного пульта управления, а также датчиков состояния оконечных устройств РЛС), управление испол-

нительными устройствами (подача руды, отделение алмазов и прочее), выдача сообщений оператору на системный дисплей каждые 2 с, выявление нештатных ситуаций в работе РЛС и реакция на них;

- прием новых значений параметров от пульта технолога-обогапителя (рис. 5) и передача их в оконечные блоки;
- обмен данными с АСУ предприятия через порт интерфейса RS-232/RS-485 процессорной платы.

Программное обеспечение

Программное обеспечение контроллеров обеих подсистем создано на языке Турбо Паскаль. Кроме исполняемого файла основной программы, на твердотельных дисках процессорных плат находятся также драйверы модулей подсистем. При запуске программы драйверы загружаются резидентно в ОЗУ.

Обе процессорные платы работают в режиме контроллеров. Стандартные функции BIOS, отвечающие за взаимодействие платы с клавиатурой и монитором, отключаются.

Для мониторинга отдельного сепаратора либо группы сепараторов разработан программный комплекс, реализуемый на внешнем компьютере или рабочей станции AWS-842T фирмы Advantech. Комплекс выполняет циклический опрос состояния подключенных сепараторов и численных



Условные обозначения: БР — блок регистрации; БУ — блок управления; БУРТ — блок управления рентгеновской трубкой; БУМ — блок усилителей мощности; БП — блок подключения; Тр. вода — транспортная вода

Рис. 6. Экранное окно с мнемосхемой сепаратора

значений полного набора параметров и позволяет как отображать на экране информацию о текущем состоянии сепаратора, так и фиксировать её в базе данных в виде протокола функционирования (ход извлечения, несанкционированный доступ, остановки, выход параметров за заданные границы и т.п.) с привязкой к календарному времени. На рис. 6 показано экранное окно режима отображения мнемосхемы. Анимации измерительных приборов позволяют оперативно оценить значения параметров. При наличии неисправностей мнемоника аварийного блока выделяется цветом.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Для эффективной работы РЛС очень важно заложить в программу подсистемы регистрации правильные значения разделительных признаков извлекаемого

минерала — алмаза. Для поиска таких признаков создана специальная установка УОК-1, базой для которой послужил тот же, что и для РЛС, набор IBM PC совместимых модулей (PCL-730, PCL-818HG, L-1208), размещённых непосредственно в персональном компьютере. Внешний вид данной установки, выпускаемой НПП «Буревестник», показан на рис. 7.

Установка содержит автоматическое устройство для подачи исследуемых образцов минералов в зону облучения, которое осуществляется маломощной рентгеновской трубкой. Сигнал люминесценции воспринимается фотоумножителями. Все эти узлы размещены в измерительном блоке. Далее сигнал люминесценции принимается и обрабатывается АЦП PCL-818HG. Для регистрации сигналов от образцов различной величины и светимости в широком амплитудном диапазоне (3-4 порядка) оказалось удобным использовать программное переключение входного диапазона АЦП. Плата ЦАП



Рис. 7. Общий вид настольной установки для исследования и контроля характеристик люминесценции алмазов и сопутствующих минералов

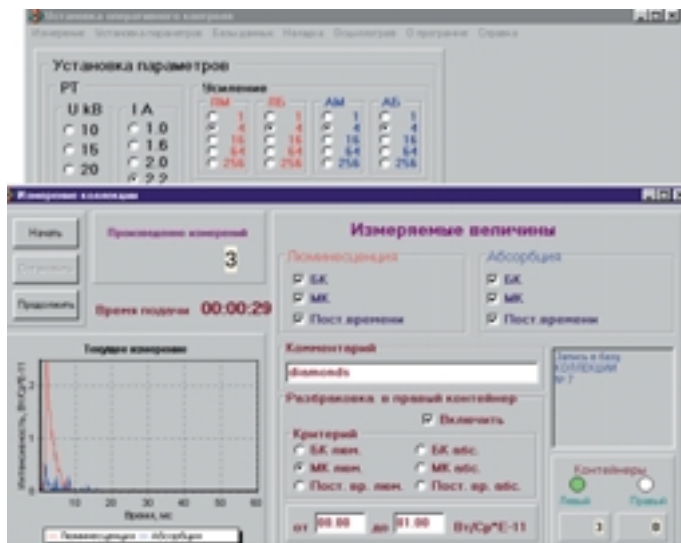


Рис. 8. Экранное окно режима просмотра коллекции минералов

обеспечивает программное управление напряжением ФЭУ и рентгеновской трубки. Источник питания рентгеновской трубки размещен в отдельном блоке.

Установка может работать в двух режимах: выполнять поштучный просмотр отдельных образцов минералов либо выполнять автоматический просмотр набора — коллекции минералов (до нескольких тысяч штук) с загрузкой из бункера.

Для работы с установкой создана программа на языке Delphi 4 в среде Windows 98. На рис. 8 показано экранное окно режима просмотра коллекции. В окне можно выделить области задания измеряемых параметров, задания режима и уровня разбраковки образцов, подсчета просмотренных образцов. Имеется возможность графического представления сигнала текущего образца. Результат просмотра записывается в базу данных и доступен для дальнейшей обработки средствами Windows.

В отличие от РЛС в установке УОК-1 регистрация сигналов производится не в 4 точках цикла, что вполне достаточно для сепаратора, а через 100 мкс. Кроме того, перед АЦП размещены фильтры верхних и нижних частот (ФВЧ и ФНЧ) с общим входом и выходом на два канала АЦП, причем ФНЧ подключён непосредственно, а ФВЧ — через пиковый детектор. Амплитуда МК определяется как максимальное значение сигнала на выходе ФНЧ, а амплитуда БК как значение сигнала на выходе пикового детектора за вычетом люминесценции воздуха (она измеряется предварительно и используется для всех исследуемых образцов).

Дополнительно установка оснащена световодами, позволяющими «видеть» люминесценцию как со стороны облучения, так и «на просвет» — в установке используются 2 ФЭУ. Прозрачный алмаз пропускает сигнал люминесценции, а непрозрачные сопутствующие минералы — нет. Этот эффект усиливает разделительные признаки. Для регистрации сигналов во втором оптическом канале используется аналогичный набор аппаратуры. При исследовании люминесценции в различных режимах облучения применяется программный задатчик — ЦАП. Всего установка формирует для каждого образца 6 параметров. Для нормирования сигналов люминесценции служит специальный аттестованный эталон — алмаз, который вводится в зону облучения по сигналам управляющей программы.

По сути, установка может использоваться в качестве мини-сепаратора, но с расширенным набором признаков разделения — от 1 до 6. Такой режим в программном обеспечении предусмотрен. Производительность установки УОК-1 при использовании её в качестве мини-сепаратора невелика — до 1200 объектов в час.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная система показала несомненную эффективность нового подхода к автоматизации с использованием готовых IBM PC совместимых технических средств. В этом случае расширяются функциональные возможности системы автоматизации как за счет использования цифровых методов анализа сигналов, так и за счет эффективного контроля режима работы сепаратора и мониторинга процесса обогащения системами верхнего уровня.

Цель нового шага автоматизации состоит не в попытке повысить извлечение алмазов непосредственно (как уже указывалось, действующие сепараторы обеспечивают извлечение до 98-99% алмазов при правильной настройке), а в обеспечении стабильно высокого извлечения при изменении влияющих на результаты сепарации эксплуатационных факторов: количества сопутствующих люминесцирующих объектов в исходной руде, коэффициента плотности потока материала, количества воды в материале, температуры окружающей среды. Это достигается как увеличением числа задаваемых в численной форме признаков, по которым формиру-

ются критерии отбора полезных объектов, так и расширенным контролем режимов работы сепаратора с возможностями оперативной обработки полученной информации, её анализа и авторегулирования функциональных параметров отдельных звеньев системы. Существенную роль играет и встроенная возможность получения достоверного отчета о работе сепаратора и наблюдении технологических режимов.

Еще одно достоинство реализованной системы — простая, в основном программная, на понятном языке высокого уровня адаптация подсистем управления и регистрации к различным типам сепараторов, ориентированных на разную величину материала, стадии обогащения, производительность. Обычно для этого требуется всего неделя работы программиста.

Общей особенностью данной разработки явилось существенное увеличение доли программной части в решении задач управления и регистрации сигналов. ●

Авторы — сотрудники НПП «Буревестник» и АК «АЛРОСА»

**Телефон/факс:
(812) 528-1352/6633**