



- выпускные данные
- знак охраны авторского права;
- комплексный книготорговый индекс.

Выходные сведения даются в соответствии с «Временной инструкцией по оформлению выходных сведений на картографической продукции».

Туристские карты иллюстрируются фотографиями и рисунками, изображающими интересные для туристов объекты, показанные на картах. Предпочтение отдаётся цветным фотографиям с изображением памятников истории, культуры и архитектуры, памятников замечательным людям, интересных объектов природы и т.д. [2]. Под иллюстрациями памятников,

скульптур, произведений монументальной живописи и т.п. после их названий помещаются фамилии авторов этих произведений. Если в тексте расширенной легенды указываются фамилии авторов, то под иллюстрациями или в общем тексте их упоминать не следует. Количество фотографий на маршрутных картах – 3–4, на обзорных – 5–6 (вместе с обложкой). Не рекомендуется многократно (более трех раз) использовать один и тот же слайд на разных картах.

Итак, в данной статье автором рассмотрена основная методика создания туристских карт, принципы и способы их оформления с целью наиболее чёткого и удобного отображения местности.

Библиографический список

1. Воробьев С.А. Путешествия по Прибайкалью. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1991. 240 с.
2. Руководство по созданию туристских обзорных и маршрутных карт; ГУГК при Совете Министров СССР. М., 1989.
3. Технология создания электронных карт по исходным картографическим материалам. Редакция 1.0. Ногинск: Пано-рама, 1991–2000. 9 с.

УДК 658.011.56

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ СООТНОШЕНИЯ РУДА/ВОДА В МЕЛЬНИЦАХ С ЦИРКУЛИРУЮЩЕЙ НАГРУЗКОЙ

© В.А. Кондратец¹

Кировоградский национальный технический университет,
25006, Украина, г. Кировоград, пр. Университетский, 8.

Рассматривается получение алгоритма с неполным выполнением условий инвариантности для идентификации соотношения руда/вода в мельнице с циркулирующей нагрузкой. Он уменьшает влияние погрешности определения входных величин на выходную. Приняты меры по устранению влияния запаздывания на результат идентификации. Показано, что плотность руды, содержание влаги в песках классификатора, расход воды в песочный желоб могут быть приняты постоянными. Измерению подлежат расход руды и воды в мельницу, расход пульпы в песочном желобе; оптимизацией установлены их допустимые погрешности – соответственно $\pm 1,0\%$, $\pm 1,0\%$ и $\pm 3,0\%$. Наибольшая погрешность идентификации составила $\pm 1,9\%$, реально она может быть равной около $\pm 1,5\%$. Алгоритм и система управления могут быть реализованными на промышленных контроллерах, что минимизирует расход электроэнергии, материалов и повышает производительность технологической линии.

Ил. 2. Табл. 2. Библиогр. 5 назв.

Ключевые слова: алгоритм; условия инвариантности; погрешность; запаздывание; оптимизация.

ENSURING ORE/WATER RATIO IDENTIFICATION IN MILLS WITH CIRCULATING LOAD

V.A. Kondratets

Kirovograd National Technical University,
8 Universitetsky pr., Kirovograd, 25006, Ukraine.

The article discusses the receiving of the algorithm with the incomplete fulfillment of invariance conditions in order to identify the ore/water ratio in a mill with circulating load. The algorithm reduces the effect of the input value determination error on the output value. Measures have been taken to reduce the influence of the lag on the identification result. It is shown that the density of ore, the moisture content in classifier sands, water flow rate in a sand gutter can be made constant. The subjects of measurements are ore consumption ratio and water flow rate in the mill as well as crushed ore loss in the sand gutter. By means of optimization their allowable errors are determined as: $\pm 1.0\%$, $\pm 1.0\%$ and $\pm 3.0\%$ respectively. The highest identification error is $\pm 1.9\%$. In reality it can equal to $\pm 1.5\%$. The algorithm and the control system can be implemented on industrial controllers. It will minimize the consumption of electric power and material as well as improve the performance of a production line.

2 figures. 2 tables. 5 sources.

Key words: algorithm; invariance conditions; error; lag; optimization.

¹Кондратец Василий Александрович, кандидат технических наук, профессор кафедры автоматизации производственных процессов, тел.: (38097) 9219264, e-mail: matsuyan@mail.ru
Kondratets Vasily, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation of Production Processes, tel.: (38097) 9219264, e-mail: matsuyan@mail.ru



Проблема и её связь с научными и практическими задачами. В современных условиях всё большую часть сырья для чёрной металлургии получают путём обогащения бедных железных руд, где наиболее энергоёмкими и ресурсоёмкими являются операции дробления и измельчения, на которые расходуется до 70% потребляемой горно-обогатительным комбинатом электроэнергии. На эти процессы тратится до 20% всей электроэнергии мира. Кроме того, процессы измельчения требуют больших капитальных затрат и наибольших затрат металла. Поэтому решение задач повышения эффективности измельчения руд входит в приоритетные направления развития науки и техники большинства стран мира. Основными направлениями повышения эффективности измельчения руд являются оптимизация конструкций применяемого оборудования, технологических схем, режимов измельчения и средств автоматического управления [3]. Разработка автоматических средств контроля режимов измельчения является важной частью информационного обеспечения систем управления этим процессом [3]. Одним из важнейших параметров информационных систем выступает соотношение руда/вода в мельнице [2, 5], особенно в технологических агрегатах, которые работают в замкнутом цикле с механическими спиральными классификаторами и получили наибольшее распространение в первых стадиях измельчения рудообогатительных фабрик.

Анализ исследований и публикаций. Существующие системы автоматизированного управления процессом измельчения исходной руды базируются на устаревших подходах идентификации соотношения руда/вода, которые не обеспечивают необходимой точности определения технологического параметра. Из-за этого мельницы работают при разжижениях пульпы, далёких от оптимальных значений, что негативно отражается на качестве измельчённого продукта и характеристиках энергоэффективности самого процесса измельчения.

Решение задачи стабилизации соотношения руда/вода в мельницах в конкретных технологических условиях, что возможно при обеспечении требуемой точности идентификации параметра, позволит оптимизировать режим работы технологического агрегата и получить наилучшие показатели измельчения сырья. Поддержание разжижения пульпы на оптимальном значении в конкретных технологических условиях гарантирует необходимое время пребывания материала в мельнице, наилучшую эффективность работы измельчающих тел, что приведёт к требуемым характеристикам измельчаемого материала в разгрузке при наибольшей производительности для данного процесса, минимизации расхода электрической энергии, измельчающих тел и футеровки, продлению межремонтных периодов оборудования.

Целью исследований является разработка алгоритма, условий, приборного обеспечения для достижения необходимой точности идентификации соотношения руда/вода в мельницах с циркулирующей нагрузкой при измерении одного из параметров с низкой точностью.

Изложение материала и результаты. Первая стадия измельчения руды несёт основную нагрузку при подготовке сырья к обогащению. В наиболее распространённых технологических схемах барабанная мельница работает в замкнутом цикле с механическим спиральным классификатором. Поскольку попытки стабилизации исходного питания путём внедрения систем усреднения исходной руды широкого применения не нашли [3], в настоящее время более широко практикуют раздельную переработку отдельных типов руд. Практика показывает, что в условиях карьера конкретной магнитообогатительной фабрики выделяют до семи типов руд, из которых два-четыре представляют основной объём сырья. Организация бункерного хозяйства и технологического процесса позволяет осуществлять переработку руд с учётом характеристик каждого типа.

Анализ технологического процесса измельчения показал, что обеспечить требуемое качество продукта на выходе возможно лишь управлением соотношения руда/вода на входе измельчительного агрегата, что требует идентификации параметра разжижения пульпы в конце входных материальных коммуникаций мельницы.

Для получения удовлетворительных результатов измельчения соотношение руда/вода в мельнице не должно выходить за пределы $\pm 3,0\%$ от установленного значения, соответствующего конкретной технологической ситуации. Наиболее простым и достаточно эффективным является алгоритмический подход повышения точности идентификации соотношения руда/вода [1]. Входные материальные коммуникации мельницы позволяют получить один из вариантов такого алгоритма. Соотношение руда/вода определяют как отношение массы твёрдого к массе жидкого продукта во входном потоке. Путём несложных математических преобразований получено значение циркулирующей нагрузки в замкнутом цикле измельчения:

$$Q_{ци} = \frac{\delta_p}{1 + K_{II} \delta_p / \delta_e} (Q_{II} - Q_{вжс}) = A(Q_{II} - Q_{вжс}), \quad (1)$$

где $Q_{ци}$ – циркулирующая нагрузка; $A = \delta_p / (1 + K_{II} \delta_p / \delta_e)$ – переменная константа, зависящая от плотности руды δ_p , воды δ_e и содержания влаги в песках классификатора K_{II} ; Q_{II} , $Q_{вжс}$ – соответственно объёмный расход пульпы в песковом жёлобе и воды в песковый жёлоб классификатора.

С учётом формулы (1) уравнение для определения соотношения руда/вода на входе в мельницу возможно записать в виде:

$$K_{P/B} = \frac{A(Q_{II} - Q_{вжс}) + Q_p}{Q_{вм} + Q_{вжс} + K_{II} [A(Q_{II} - Q_{вжс})]}, \quad (2)$$



где Q_p – массовый расход руды в мельницу; $Q_{вм}$, $Q_{вжсм}$ – соответственно массовые расходы воды в мельницу и песковый желоб классификатора.

Полученный алгоритм (2) содержит $Q_{вм}$, $Q_{вжсм}$, A как в числителе, так и знаменателе, что обеспечивает полное выполнение условий инвариантности $K_{P/B}$ к этим параметрам.

Итак, алгоритм (2) имеет свойство компенсации абсолютного значения погрешности измерения объёмного расхода пульпы в песковом желобе классификатора, воды в песковый желоб и ошибки определения переменной константы A . В свою очередь переменная константа A также имеет свойство компенсации абсолютного значения ошибки определения плотности руды δ_p , что способствует повышению точности идентификации соотношения руда/вода на входе в мельницу.

С другой стороны, высокую точность идентификации соотношения руда/вода по алгоритму (2) возможно получить лишь тогда, когда измерения параметров, входящих в зависимость, будут производиться в одной технологической точке, то есть без различного запаздывания. Из анализа входных материальных коммуникаций мельницы, в которые входят магистраль подачи воды в технологический агрегат, конвейер подачи руды, песковый желоб классификатора, магистраль подачи воды в песковый желоб и улитковый питатель, следует, что перечисленные транспортные средства отличаются различным запаздыванием. Наименьшим запаздыванием отличаются магистраль подачи воды и руды в мельницу, несколько большим будет запаздывание в улитковом питателе, таким же будет запаздывание при измерении объёмного расхода пульпы, если информационное средство разместить в конце пескового желоба классификатора. Следующим большим по величине будет запаздывание при определении влажности песков классификатора, а наибольшим – при подаче воды в песковый желоб, так как она вводится в самом его начале. Однако очевидно, что непосредственно задачу идентификации соотношения руда/вода с обеспечением высокой точности по алгоритму (2) решить нельзя. Наибольшая погрешность будет вноситься по каналу измерения влажности песков и объёмного расхода воды в песковый желоб ввиду существенных запаздываний. Кроме того, измерение влажности песков классификатора представляет собой довольно сложную техническую задачу, обеспечить высокую точность проблематично. В то же время, как показал анализ, существующие представления о влагосодержании измельчённых материалов в условиях механического спирального классификатора выдерживаются не полностью. При формировании и транспортировании песков в механическом спиральном классификаторе возникают процессы саморегулирования, что способствует стабилизации влаги в измельчённом материале. Исходя из этого, были проведены исследования влажности песков классификатора в промышленных условиях Криворожского бассейна.

Изучение влагосодержания песков осуществлялось на механических двухспиральных классификаторах одновременно на трех секциях обогатительной фабрики в течение четырех месяцев на каждой. Всего исследования заняли семь месяцев. В установившемся режиме работы в соответствии с действующими правилами отбирались пробы со всех продуктов классификатора, фиксировался расход исходной руды в мельницу по показаниям конвейерных весов. Отобранные пробы сокращались и обрабатывались. Влажность песков определялась непрямым методом. Кюветы с отобранными песками в сушильной камере с температурой 105–110°C обрабатывались до неизменного веса. Количество потерянной измельченным материалом влаги определялось как разность исходного веса пробы с кюветой и кюветы с высушенным материалом. Масса сыпучего материала в пробе и количество потерянной в процессе сушки воды служили основанием для определения процентного содержания твёрдого в песках. Высушенные пробы после сокращения рассеивались на классы крупности. По балансу класса (-0,074 мм + 0) и расходу руды в мельницу определяли продуктивность по пескам. В процессе исследований выполнено 229 экспериментов, из них по отдельным секциям – 75, 86 и 68. Содержание твёрдого в экспериментах изменялось от 84 до 92%, а массовый расход пескового продукта – от 120 до 860 т/час. Проверка экспериментальных данных с помощью критерия Пирсона подтвердила нормальность их распределения. Применение трехсигмового критерия показало, что в экспериментально полученной выборке нет грубых ошибок и отбрасывать резко выделяющиеся результаты испытаний не следует. Ввиду этого дальнейшей статистической обработке подвергались результаты, полученные в 229 экспериментах.

При обработке экспериментальных данных принимались зависимости, предназначенные для выборок с числом испытаний, превышающим 60. В результате обработки экспериментальных данных установлено, что все показатели достаточно близки между собой. Среднее значение содержания твёрдого в песках по секциям составило 88,65; 87,98; 88,05%, а по всему массиву – 88,22%. Полученные выборочные средние квадратические отклонения содержания твёрдого от среднего результата по секциям имели значения 1,52; 1,45; 1,43%, а по всей выборке – 1,49%. Сравнение дисперсий между собой осуществлялось с помощью F -критерия, а средних значений содержания твёрдого в песковом продукте – с помощью t -критерия Стьюдента. Установлено, что как дисперсии, так и средние значения содержания твёрдого равны между собой и относятся к одной генеральной совокупности. Отсюда можно сделать вывод, что содержание твёрдого в песковом продукте механического спирального классификатора не зависит от массового расхода песков, особенностей обогатительной секции, состояния её оборудования в пределах возможностей эксплуатации и свойств руды в условиях конкретного месторождения. Колебания содержания твёрдого относительно среднего значения в выборках можно объяснить несколькими



причинами, которые проявлялись в каждом эксперименте. Это неравномерность размещения влаги в разгружаемом песковом продукте и неидентичность отбора проб с учётом точек и временных фаз движущегося материала, неточность взвешивания кюветы с исходным материалом, неточность взвешивания кюветы с высушенным материалом, неточность определения веса сухой пробы из-за приставания частиц к металлической поверхности кюветы, влияние неудалённого приставшего к кювете материала на результаты последующего опыта. Влияние этих причин, а также человеческого фактора полностью исключить невозможно, потому рассеивание содержания твёрдого в пробах следует признать в основном их следствием. Также не исключается некоторое влияние свойств перерабатываемых руд. Исходя из сказанного, можно полагать, что содержание твёрдого в песковом продукте исследуемого месторождения составляет 88,22%, а влажности – 11,78%. Тогда K_{II} в алгоритме (2)

будет равно 0,12. Неизменность значения $K_{II} = 0,12$ во времени исключает влияние запаздывания при определении соотношения руда/вода по алгоритму (2) и необходимость измерения параметра.

Аналогичным подходом возможно исключить влияние запаздывания на идентификацию соотношения руда/вода по алгоритму (2) по каналу измерения расхода воды в песковый жёлоб классификатора. Для этого необходимо выполнить условие $Q_{вжс} = const$. Однако при некотором выбранном неизменном расходе воды в песковый жёлоб классификатора разжижение пульпы с изменением циркулирующей нагрузки не должно выходить за границы её нормальной транспортируемости. При этом плотность пульпы в песковом жёлобе односпирального классификатора определяется зависимостью

$$\gamma_{II} = \frac{Q_m}{Q_v} = \frac{k_{ци}(1 + K_{II})Q_p + Q_{вжс}}{k_{ци}(1/\delta_p + K_{II}/\delta_e)Q_p + Q_{вжс}/\delta_e}, \quad (3)$$

где Q_m, Q_v – соответственно массовый и объемный расход пульпы в песковом жёлобе; $k_{ци}$ – коэффициент, характеризующий значение циркулирующей нагрузки в доле питания мельницы рудой.

Из уравнения (3) следует, что при определенном значении плотности может усложниться движение материала в песковом жёлобе и улитковом питателе. Чтобы этого не случилось, необходимо определить расход воды в песковый жёлоб при условии максимально допустимой плотности пульпы при наибольшем значении циркулирующей нагрузки. Тогда с уменьшением циркулирующей нагрузки плотность пульпы будет снижаться, но должно гарантироваться условие возможности поддержания заданного соотношения руда/вода в мельнице, поскольку пески могут быть сильно разжиженными. Учитывая, что циркулирующая нагрузка на обогатительных фабриках Криворожского бассейна составляет 50–150%, возможно принять её наибольшее значение 200%, а коэффициент $k_{ци} = 2,0$. Это позволяет записать уравнение для определения неизменного расхода воды в песковый жёлоб классификатора в виде:

$$Q_{вжс} = \frac{k_{ци\max} Q_p}{(\gamma_{II}/\delta_e - 1)} \left[(1 + K_{II}) - \gamma_{II} (1/\delta_p + K_{II}/\delta_e) \right]. \quad (4)$$

Принимая значение $\gamma_{II\max} = 2,5 \text{ т/м}^3$, $Q_p = 260 \text{ т/час}$, $K_{II} = 0,12$, $\delta_p = 3,3 \text{ т/м}^3$, получаем $Q_{вжс} = 24,27 \text{ т/час}$. Примем $Q_{вжс} = 24,3 \text{ т/час}$.

В процессе компьютерного моделирования разжижения песков механического односпирального классификатора источником с неизменным расходом воды $Q_{вжс} = 24,3 \text{ т/час}$ установлено, что в пределах изменения циркулирующей нагрузки и расхода исходной руды плотность пульпы в песковом жёлобе изменялась от значений 2,5 до 2,05 т/м^3 . Этот диапазон изменения плотности пульпы в песковом жёлобе удовлетворяет условиям её транспортирования. При этом в песковом жёлобе не создаётся чрезмерное обводнение песков и в мельнице гарантированно возможно выдерживать необходимое соотношение руда/вода, например $K_{р/в} = 4,3$. В наиболее вероятном диапазоне изменения расхода руды в мельницу 160–200 т/час эти показатели становятся ещё лучшими. Плотность пульпы в песковом жёлобе находится в допустимых границах и при изменении плотности руды в пределах 3,1–3,5 т/м^3 . Изложенное подтверждает возможность подачи воды в песковый жёлоб односпирального классификатора от источника с неизменным расходом. Для рассмотренного случая расход воды должен составлять 24,3 т/час . Этот параметр также возможно вводить в систему как константу.

Если объемный расход пульпы измерять в конце пескового жёлоба, то эта информация относительно входящего в мельницу материального потока будет отставать на время запаздывания улиткового питателя, которое является неизменным и определяется его конструктивными и эксплуатационными характеристиками. Для исключения влияния запаздывания на результаты идентификации соотношения руда/вода по алгоритму (2) необходимо время запаздывания в магистральных подачах руды и воды приравнять к значению параметра в улитковом питателе. Это легко достигается установкой конвейерных весов в определённой точке или подбором скорости движения ленты и выбором длины и наклона лотка, подающего воду в мельницу. Как видно, технически возможно устранить влияние запаздываний на снижение точности идентификации соотношения руда/вода по алгоритму (2).



Рассмотрим влияние погрешностей определения параметров в алгоритме (2) на точность идентификации соотношения руда/вода. Введём понятие базового значения $K_{(P/B)б}$, определённого при значениях параметров без погрешности. В данном случае оно соответствует $K_{P/B} = 4,3$. Если какой-либо из шести параметров (δ_p , K_{II} , $Q_{вж}$, Q_{II} , Q_p , Q_B) не будет соответствовать базовому значению, соотношение руда/вода по алгоритму (2) будет идентифицировано с погрешностью. При компьютерном моделировании данного процесса установлены зависимости относительной погрешности идентификации соотношения руда/вода по алгоритму (2) от относительной погрешности определения одного из параметров для случая, когда остальные соответствуют базовому значению (рис. 1). Из зависимости, приведённой на рис. 1, видно, что алгоритм (2) обладает свойством компенсации по всем шести параметрам, однако степень компенсации по каждому из них различна. Наибольшее влияние на погрешность идентификации $K_{P/B}$ оказывает точность измерения расхода воды в мельницу, наименьшее – плотность руды. При определённом знаке погрешности измерения параметров три фактора в результате идентификации $K_{P/B}$ вносят отрицательную погрешность и три – положительную. Все эти факторы попарно вносят практически одинаковое влияние на $K_{P/B}$ с противоположными знаками.

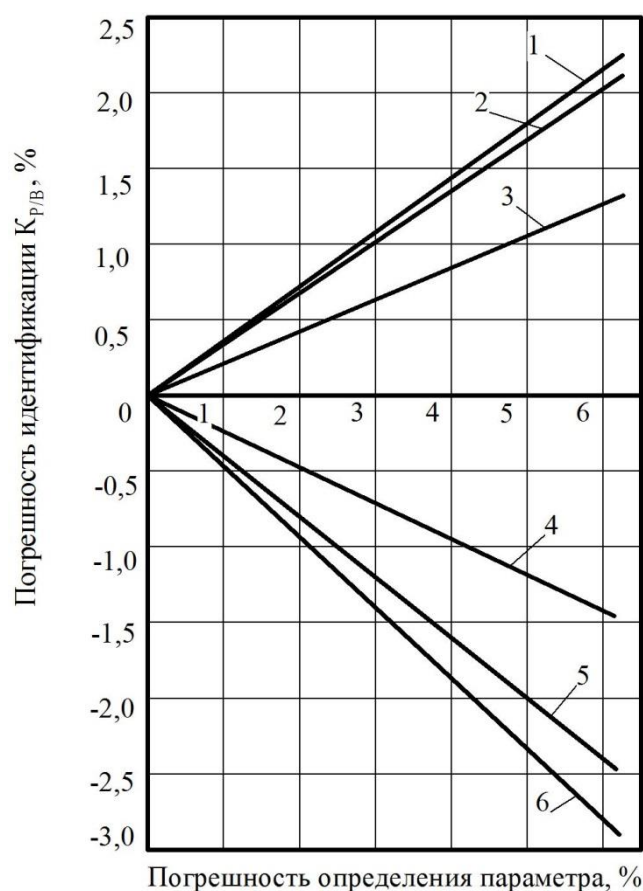


Рис. 1. Зависимость относительной погрешности идентификации соотношения руда/вода в мельнице от погрешности определения одного из параметров: 1 – Q_p ; 2 – Q_{II} ; 3 – δ_p ; 4 – $Q_{вж}$; 5 – K_{II} ; 6 – Q_B

Из представленных графиков также следует, что при идентификации соотношения руда/вода в мельнице все параметры вносят определённую погрешность (см. рис. 1). Без принятия специальных мер результирующая погрешность идентификации соотношения руда/вода в мельнице может быть чрезмерно высокой. Снизить её возможно уменьшением погрешности измерения и определения параметров. Особенно высокую точность желательно обеспечить при определении расхода воды в мельницу, расхода руды в мельницу, объёмного расхода пульпы в песковом жёлобе. Ощутимое влияние оказывает и точность измерения (или определения) расхода воды в песковый жёлоб. Ситуация усложняется ещё и тем, что на влагосодержание песков классификатора повлиять нельзя, а расход пульпы в песковом жёлобе существующими средствами точно измерить не представляется возможным. Достичь желаемого результата идентификации $K_{P/B}$ возможно только конкретным анализом вклада каждого из перечисленных факторов.

Плотность руды δ_p будет устанавливаться в зависимости от типа перерабатываемого сырья. При эксплуа-



тационных колебаниях плотности руды в пределах одного типа ошибка идентификации будет незначительной. K_{II} есть постоянная, которая может в производственных условиях изменяться в небольших пределах.

Объёмный расход воды в песковый жёлоб классификатора в данном случае должен быть 24,3 м³/час, но реальный расход будет определяться точностью стабилизации этого параметра. В промышленности такие задачи обычно решают системами автоматической стабилизации расхода воды, которые включают расходомер, автоматический регулятор, регулирующий орган (клапан). В таких системах погрешность стабилизации расхода достаточно велика, поскольку она превышает погрешность измерительного устройства. Кроме того, такие системы потребляют значительную энергию. Ввиду этого разрабатывалась специальная система подачи воды в песковый жёлоб классификатора, схема которой показана на рис. 2. В результате математического моделирования получена зависимость скорости движения воды в канале от параметров гидравлического преобразователя:

$$v = \sqrt{\frac{2gH}{\alpha \frac{d_2^2}{d_3^2} + \lambda \frac{l_2}{d_2} + \lambda \frac{l_3}{d_3} \cdot \frac{d_2^2}{d_3^2} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_2^2}{d_1^2}\right) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_3^2}{d_2^2}\right) \frac{d_2^2}{d_3^2}}}, \quad (5)$$

где α – безразмерный коэффициент, который учитывает неравномерность распределения скоростей, принимаемый значение $\alpha = 1$ для турбулентных потоков; λ – коэффициент Дарси, который в данном случае равен 0,9009; g – ускорение земного притяжения.

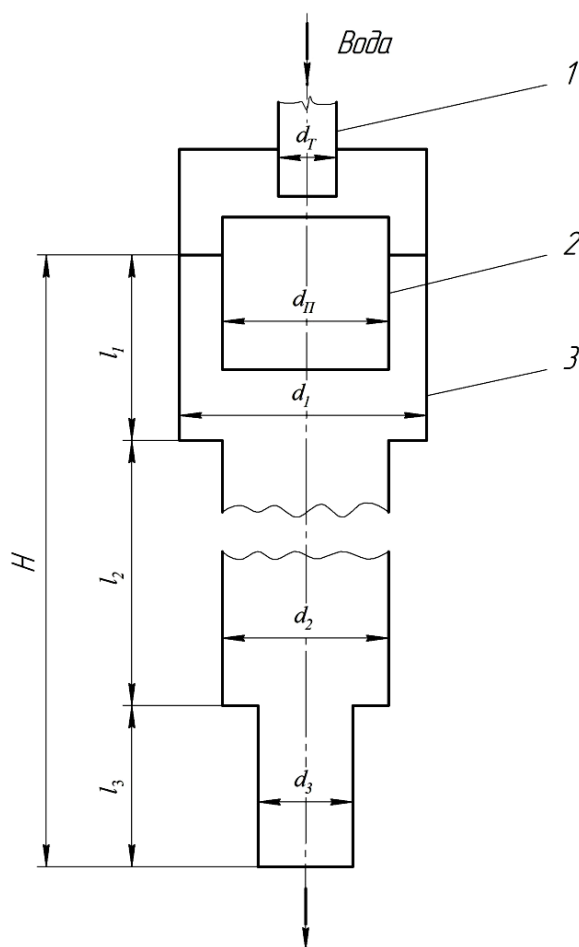


Рис. 2. Схема системы подачи воды в песковый жёлоб классификатора: 1 – трубопровод; 2 – поплавок; 3 – гидравлический преобразователь

С учётом принятых значений параметров зависимость (5) возможно представить в виде:

$$v = 1,25339 \sqrt{H}, \text{ м/с.} \quad (6)$$

Изменения скорости движения воды в канале гидравлического преобразователя от её уровня (формула (6)) приведены в табл. 1.



Таблица 1

Зависимость скорости движения воды в канале гидравлического преобразователя от её уровня

Напор (уровень) воды, H , м	1,0	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05
Скорость движения воды, v , м/с	1,25339	1,259641	1,265862	1,272052	1,278212	1,284343
Относительная погрешность изменения скорости воды, %	0	0,5	1,0	1,49	1,98	2,47

Данные, приведённые в табл. 1, свидетельствуют, что относительная погрешность дозирования не превышает 1,0% при отклонении уровня воды до 20 мм. Это позволяет стабилизировать уровень воды в гидравлическом преобразователе путём перелива. Однако реализовать такой подход нецелесообразно из-за перерасхода водных ресурсов. Необходимое значение уровня воды в гидравлическом преобразователе значительно точнее можно поддерживать автоматическим регулированием, например, сравнивая усилия, действующие на верхний торец цилиндрического поплавка 2, со стороны струи, вытекающей из магистрального трубопровода 1, и поплавка 2, выталкивающегося жидкостью (см. рис. 2). Такой автоматический регулятор компенсирует влияние изменения давления воды в магистрали. Относительная погрешность данной системы подачи воды в песковый жёлоб классификатора составляет порядка $\pm 1,0\%$. В соответствии с зависимостью (4) это может внести погрешность в общий результат идентификации $K_{P/B}$ порядка $\pm 0,25\%$ (см. рис. 1).

Итак, рассмотренные параметры можно считать константами, которые практически не влияют на результат идентификации соотношения руда/вода по алгоритму (2). Тогда обеспечение точности идентификации соотношения руда/вода в мельницах замкнутых циклов сводится к рассмотрению измеряемых величин – Q_p , Q_B , Q_{II} .

Наилучшие результаты идентификации возможно получить в процессе оптимизации при одновременном учёте влияния на $K_{P/B}$ всех трёх факторов. При этом допустимую погрешность идентификации $K_{P/B}$ возможно обеспечить за счёт высокой точности измерения одних параметров и более низкой точности контроля других. Анализ показал, что для решения этой задачи оптимизации лучше подходит метод динамического программирования.

Учитывая, что в процессах обогащения относительная погрешность информационных средств может быть принятой на уровне $\pm 3,0\%$, критерий оптимальности возможно установить равным или близким к этому значению, то есть $J_{\text{опт}} \leq 3,0\%$. Учитывая, что влияние отдельных факторов на $K_{P/B}$ можно рассматривать в виде последовательных операций, процесс оптимизации представим как три независимые, в которых получают частные критерии оптимальности. Результирующий критерий оптимальности будет равен сумме показателей в каждой стадии.

Оптимизацию в первой стадии свведём к выбору средства измерения расхода руды в мельницу. В табл. 2 при принятых значениях параметров в алгоритме (2) приведены абсолютные погрешности идентификации соотношения руда/вода в мельнице, возникающие под действием измерения расхода руды с определённой относительной погрешностью. Из данных, представленных в табл. 2, следует, что абсолютная погрешность идентификации $K_{P/B}$ с увеличением относительной погрешности измерения расхода руды возрастает. Наилучшими результатами будут при наименьшей погрешности измерения. Конвейерные весы обеспечивают погрешность измерения расхода руды на уровне одного процента. Поэтому отклонение фактического значения $K_{(P/B)ф}$ от базового $K_{(P/B)б}$ составит 0,01580, то есть $J_{абс} = 0,01580$ в первой стадии оптимизации. Оптимизацию во второй стадии проведём относительно измерения расхода воды в мельницу (см. табл. 2). Здесь получаем аналогичные результаты с противоположным знаком отклонения. Расход воды в мельницу целесообразно измерять магнито-индуктивным расходомером 8045, который обеспечивает относительную погрешность $\pm 1\%$. Критерий оптимальности во второй стадии оптимизации составит $J_{абс} = 0,02069$.

Таблица 2

Абсолютные погрешности идентификации соотношения руда/вода в мельнице при измерении варьируемых параметров с различной точностью

Варьируемый параметр	Относительные погрешности измерения варьируемых параметров, %				
	1	2	3	4	5
Расход руды в мельницу	0,01580	0,03159	0,04730	0,06321	0,07912
Расход воды в мельницу	-0,02069	-0,04110	-0,06106	-0,08084	-0,10105
Расход пульпы в песковом жёлобе	0,01520	0,03038	0,04515	0,06020	0,07482

Третья стадия оптимизации связана с выбором расходомера пульпы в песковом жёлобе классификатора. Наилучшими характеристиками обладает разработанный четырёхканальный сканирующий поверхность движущегося материала объёмный расходомер, который определяет параметр по высоте потока, охватывая всё его поперечное сечение. Такой расходомер обеспечивает относительную погрешность измерения объёмного расхода в пределах $\pm 3,0\%$. В связи с этим на данной стадии оптимизации абсолютная погрешность идентификации $K_{P/B}$ увеличится на самую большую величину. Критерий оптимальности $J_{абс} = 0,04515$. Результирующий критерий



оптимальности будет равен сумме абсолютных значений частных критериев, то есть $J_{абс} = 0,08164$, а его относительное значение – $J_{отн} = 1,9\%$, что значительно меньше его граничного значения $3,0\%$. Оптимизация процесса в других технологических условиях работы обогащательной секции даёт близкие результаты.

Идентификация соотношения руда/вода по алгоритму (2) осуществляется в соответствии с заданными константами δ_p , K_{II} , $Q_{вж}$ и измеренными расходами руды, воды в мельницу и пульпы в песковом жёлобе. При этом погрешность идентификации может возникать из-за некоторых отклонений заданных параметров от их базовых значений. Как было показано, такие изменения незначительны, и этой погрешностью можно пренебречь. Влияние на $K_{P/B}$ измеряемых величин более существенно, так как измеряемые величины независимы и имеют случайный характер изменения, то $K_{P/B}$, определяемое по отдельным фиксированным значениям Q_p , Q_B , Q_{II} , будет также случайным процессом, формируемым под влиянием погрешностей измерения параметров. Это требует фильтрации данного сигнала. В качестве алгоритма фильтрации следует принять расчёт поточного среднего значения сигнала на обоснованном временном интервале, то есть при определении значения $K_{P/B}$ будет выполнено достаточно много измерений параметров с погрешностями. Положительные погрешности появляются так же часто, как и равные им по абсолютной величине отрицательные погрешности. Вследствие этого при достаточно большом числе измерений в ряду случайных погрешностей можно ожидать равномерное появление погрешностей, равных или близких по абсолютной величине и разных по знаку. Тогда вправе ожидать, что положительные и отрицательные погрешности будут компенсироваться, значительно улучшая результат идентификации. Информационные средства обычно характеризуются средней квадратической погрешностью. Такая погрешность будет присуща и средству идентификации соотношения руда/вода, определяемая по его конкретным значениям. При этом абсолютная погрешность $\pm 0,08164$ будет наибольшей, в условиях компенсации она будет уменьшаться в некоторых случаях теоретически до нуля. Если учесть, что все отклонения $K_{P/B}$ от базового значения имели наибольшее значение, то относительная средняя квадратическая погрешность будет равна $\pm 1,9\%$. Если же, например, половина измерений окажется с отклонениями в два раза меньшими – $\pm 0,04082$, то данная погрешность составит $1,5\%$. Это позволяет утверждать, что данный алгоритм гарантированно может обеспечить допустимую относительную погрешность $\pm 3,0\%$ идентификации соотношения руда/вода в меньших при измерении объёмного расхода пульпы в песковом жёлобе классификатора со сравнительно низкой точностью. Предложенный алгоритм использован в системе автоматического регулирования разжижения пульпы в шаровых мельницах с циркулирующей нагрузкой [4], которая может быть реализована на базе промышленных контроллеров.

Таким образом, одним из основных условий оптимизации процесса измельчения руд в барабанных мельницах, работающих в замкнутом цикле с классификатором, является поддержание необходимого разжижения пульпы в конкретных технологических ситуациях. Разработанный алгоритм, включающий плотность руды, содержание влаги в песках классификатора, расход воды в песковый жёлоб классификатора, расход воды в мельницу, расход руды в мельницу, объёмный расход пульпы в песковом жёлобе и реализующий неполные условия инвариантности соотношения руда/вода к погрешности измерения или изменения параметров, условия его реализации и приборное обеспечение позволяют получить необходимую точность идентификации разжижения пульпы в технологическом агрегате при определении одной из переменных с большей погрешностью. Это предоставляет возможность управлять разжижением пульпы в мельнице с достаточной точностью и, как следствие, минимизировать расход электроэнергии, футеровки, измельчающих тел, а также продлить периоды межремонтного обслуживания оборудования и увеличить производительность технологической линии. Экономический эффект от использования предложенного подхода достижения необходимой точности идентификации соотношения руда/вода обеспечивается за счёт экономии электрической энергии, материалов, затрат на ремонт оборудования и увеличения выпуска дополнительной продукции.

Библиографический список

1. Боднер В.А. Приборы первичной информации. М.: Машиностроение, 1981. 344 с.
2. Бонч-Бруевич А.М., Быков В.Л., Чинаев П.И. Бесконтактные элементы самонастраивающихся систем (схемы, расчеты, проектирование) под. ред. П.И. Чинаева. М.: Машиностроение, 1968. 292 с.
3. Измельчение. Энергетика и технология: учеб. пособ. для вузов / Г.Г. Пивняк [и др.]. М.: ИД «Руда и Металлы», 2007. 296 с.
4. Кондратец В.О., Сербул О.М. Обґрунтування системи комп'ютерної ідентифікації та регулювання розрідження пульпи у кульових млинах з циркулюючим навантаженням // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. Кривий Ріг: Изд-во ДВНЗ «Криворізьк. нац. ун-т», 2013. Вип. 34. С. 45–50.
5. Маляров П.В. Основы интенсификации процессов рудоподготовки: монография. Ростов н/Д: ООО «Ростиздат», 2004. 320 с.