

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТНАЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЗАМКНУТЫМ ЦИКЛОМ МОКРОГО ШАРОВОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Я. Г. Куваев

Национальный горный университет, Днепропетровск

Надійшла до редакції 28.03.06

Резюме: Проведен анализ традиционных решений управления замкнутыми циклами мокрого шарового измельчения. Рассмотрена структура автоматической экспертной энергосберегающей системы управления замкнутым циклом мокрого шарового измельчения. В качестве источника знаний о заполнении барабана мельницы рудой используется стохастическая модель процесса измельчения. Приведены результаты апробации системы управления в промышленных условиях.

Ключевые слова: автоматизация, энергосбережение, экспертная система управления, стохастическая модель, мокрое шаровое измельчение.

Я. Г. Куваєв. АВТОМАТИЧНА ЕКСПЕРТНА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЗАМКНЕНИМ ЦИКЛОМ МОКРОГО КУЛЬОВОГО ПОДРІБНЕННЯ.

Резюме: Проведено аналіз традиційних рішень управління замкненими циклами мокрого кульового подрібнення. Розглянута структура автоматичної експертної енергозберігаючої системи управління замкненим циклом мокрого кульового подрібнення. Як джерело знань про заповнення барабана млина рудою використовується стохастична модель процесу подрібнення. Наведені результати апробації системи управління в промислових умовах.

Ключові слова: автоматизація, енергозбереження, експертна система управління, стохастична модель, мокре кульове подрібнення.

Y. G. Kuvayev. AUTOMATIC EXPERT ENERGY-SAVING SYSTEM CONTROL OF CLOSED CYCLE OF WET BALL GRINDING.

Abstract: Analysis of traditional solutions for control of closed cycle of wet ball grinding is conducted. Automatic expert energy-saving system structure control of closed cycle of wet ball grinding is considered. Grinding process stochastic model used as knowledge source about mill drum completion of ore. Approbation results of control system in industrial conditions are given.

Keywords: automation, energy-saving, expert system control, stochastic model, wet ball grinding.

Измельчение является наиболее энергоёмким процессом как в обогащении, так и в других отраслях, где имеется производственная необходимость в помоле сырья перед основным технологическим процессом. В конце пятиде-

сятых годов прошлого века на флотационных фабриках на процессы измельчения приходилось 45–65 % общего расхода энергии, в цементной промышленности – свыше 50 % [1]. В середине 1980-х гг. энергопотребление в

процессе измельчения сырья составляло 55–60 % от всего потребления энергии любым горно-обогатительным комбинатом (ГОК) [2]. Анализ литературных источников [3, 4] позволяет сделать вывод, что в настоящий момент ситуация не изменилась.

Конструкторы измельчительного оборудования признают, что возможности улучшения основных показателей барабанных мельниц, в число которых входит энергопотребление, расход шаров и футеровки, практически исчерпаны [5]. Тем не менее на отечественных горно-обогатительных комбинатах применяются традиционные барабанные мельницы. Следовательно, проблему снижения удельных расходов электроэнергии, футеровки (а для шаровых мельниц – и шаров) необходимо решать. Очевидно, что помимо усовершенствования конструкции и улучшения технологии переработки руды снизить удельные электропотребление и расход материалов можно за счет энергосберегающего управления процессом измельчения.

Для замкнутого цикла мокрого шарового измельчения целесообразно выбрать следующую целевую функцию управления [6]:

$$d_{\text{гот}} = d_{\text{зад}}, Q_{d_{\text{гот}}} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $Q_{d_{\text{гот}}}$ – производительность замкнутого цикла измельчения по готовому классу; $d_{\text{гот}}$ – содержание частиц готового класса, выводимых из цикла измельчения классификатором в последующие стадии технологического процесса; $d_{\text{зад}}$ – заданное число частиц готового класса.

Такая целевая функция обеспечивает минимизацию удельных расходов электроэнергии и материалов при заданных технологических ограничениях, обеспечивающих максимум общего критерия эффективности обогатительной секции в целом. Это видно из формы обобщенных статических характеристик мельницы (рис. 1), описание которых приве-

дено в [2, 6, 7]. Здесь $Q_{d_{\text{гот}}}$ – производительность замкнутого цикла по готовому классу; φ_p – заполнение барабана мельницы рудой.

В установившемся режиме работы производительность замкнутого цикла измельчения по готовому классу равна расходу исходной руды в загрузочную горловину мельницы. Режимы работы замкнутого цикла, расположенные правее $\varphi_{p \text{ опт}}$, являются аварийными, левее – рабочими. При оптимальном значении заполнения мельницы рудой ($\varphi_{p \text{ опт}}$) удельные затраты электроэнергии на тонну измельченной руды минимальны. Для выхода из аварийной в рабочую часть статической характеристики подачу исходной руды в мельницу необходимо снизить либо прекратить до момента, пока заполнение мельницы рудой не станет меньшим или равным $\varphi_{p \text{ опт}}$. При пониженных подачах руды часть энергии, запасенной шарами, расходуется на разрушение брони и шаров. Это повышает удельные расходы энергоносителей, шаров и брони. Поэтому рабочую точку на статической характеристике необходимо выбирать левее и как можно ближе к $\varphi_{p \text{ опт}}$ ($Q_{d_{\text{гот}}} \rightarrow \max$).

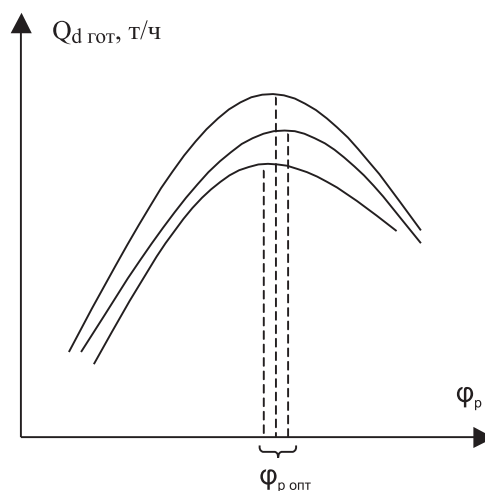


Рис. 1. Обобщенные статические характеристики барабанных мельниц

Рассмотрим объект управления, состоящий из шаровой мельницы, работающей в замкнутом цикле со спиральным классификатором (рис. 2). Такое сочетание измельчительного и классифицирующего оборудования применяется, например, на первых стадиях измельчения секций обогащения РОФ-1 Ингулецкого ГОКа. Отметим, что режим работы шаровой загрузки мельницы – водопадный.

В состав автоматической системы управления технологическим процессом (АСУТП) измельчения для удовлетворения критерия (1) "необходимо реализовать как минимум три локальные системы автоматического регулирования" [2, с. 116]; (см. также рис. 2):

- стабилизации содержания готового класса в сливе классификатора;
- стабилизации транспортировки материала внутри барабана мельницы;

- поддержания оптимальной внутримельничной загрузки измельчаемым материалом.

Обычно для устранения влияния колебаний давления в трубопроводе на расход воды ставят систему регулирования расхода воды. Для рассматриваемой схемы автоматической системы управления (см. рис. 2) необходимы две такие системы, обеспечивающие стабилизацию расхода воды в мельницу и классификатор, для которых определяющими заданиями являются сигналы с регуляторов Р2 и Р3 соответственно (на рисунке не показаны).

Анализ результатов эксплуатации автоматических систем управления замкнутыми циклами мокрого шарового измельчения на ГОКах показывает, что в подавляющем большинстве случаев для поддержания опти-

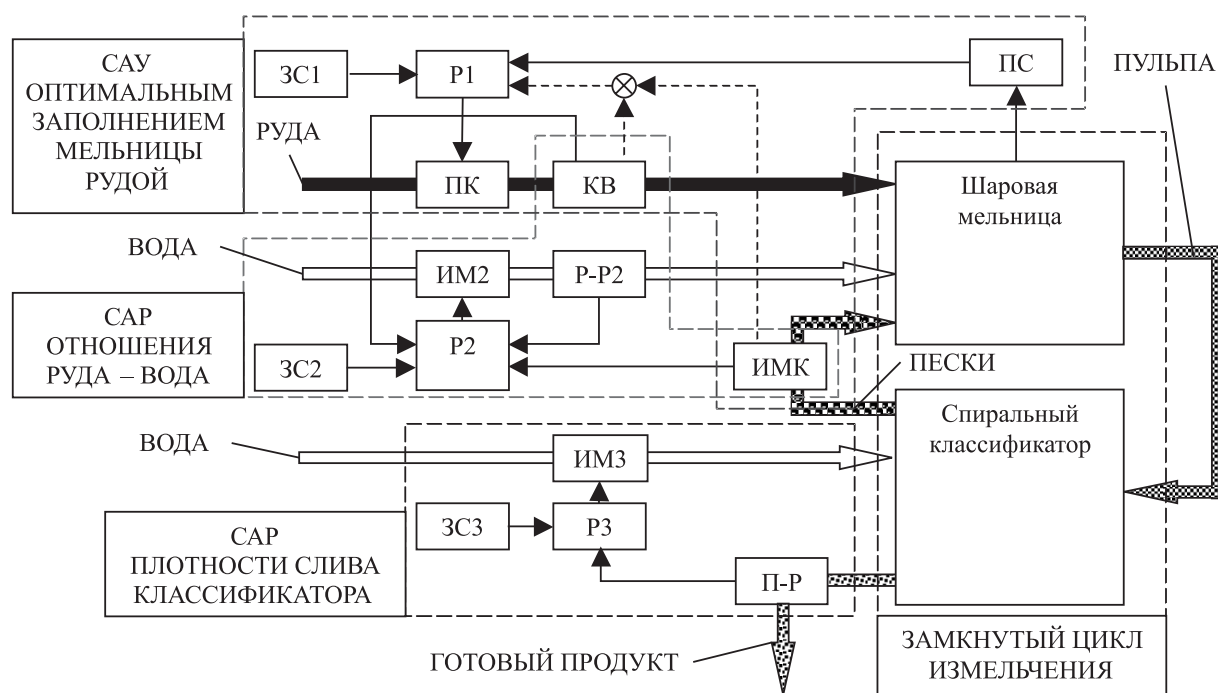


Рис. 2. Структурная схема автоматической системы управления шаровой мельницей с решеткой, работающей в замкнутом цикле со спиральным классификатором: ЗС – задатчик сигнала; Р – регулятор; ПС – преобразователь сигнала; ИМ – исполнительный механизм; ИМК – измеритель мощности приводного двигателя спирального классификатора, ПК – питательный конвейер, КВ – конвейерные весы, П-Р – плотномер, Р-Р – расходомер

мального заполнения шаровой мельницы рудой использовались системы на базе анализа шумовых характеристик мельницы [2, 8–11]. Системы, использующие в качестве опорного сигнала потребляемую приводом мельницы мощность, получили наибольшее распространение для оптимизации заполнения рудой мельниц самоизмельчения.

Коэффициент пропорциональности, связывающий акустические характеристики мельницы с ее рудным заполнением, зависит от многих факторов: износа футеровки, загрузки мельницы мелющими телами, свойств измельчаемого материала (прежде всего – его крупности). В связи с этим возникают суще-

ственные трудности с организацией автоматического поиска новой рабочей точки на статической характеристике объекта управления при изменении условий измельчения внутри барабана мельницы [2, 11–13]. Косвенно это подтверждают и исследования работы технологического оборудования первой стадии мокрого шарового измельчения Ингулецкого ГОКа, которая оснащена системой автоматического регулирования (САР) заполнения мельницы рудой по шуму. Недогруз шаровой мельницы по исходной руде составляет 5–10 %. Такая ситуация объясняется тем, что определение координат характерной точки статической характеристики вы-

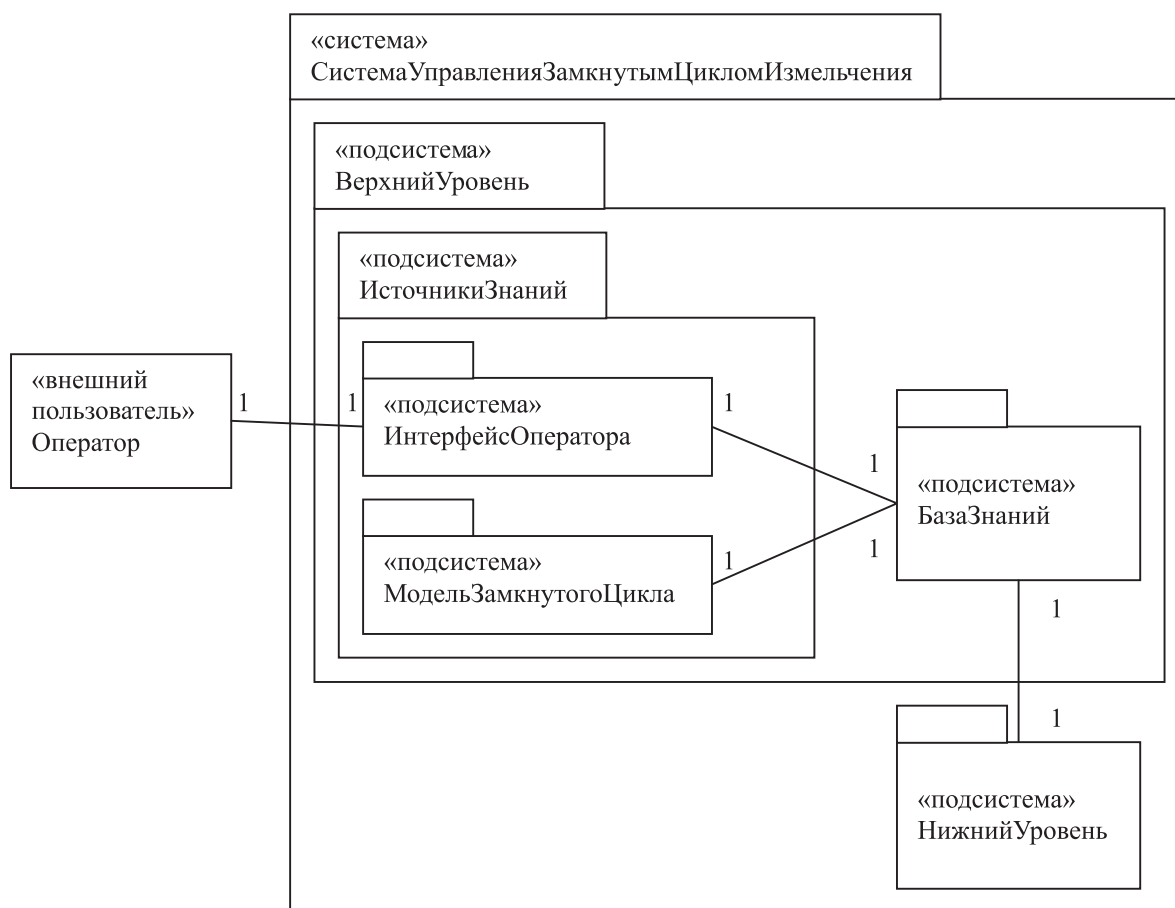


Рис. 3. Схема экспертной энергосберегающей системы управления замкнутым циклом измельчения

зывает затруднения у обслуживающего персонала. Поэтому устанавливается режим работы мельницы с пониженным расходом руды, чтобы, с одной стороны, компенсировать возмущающие воздействия, которые могут привести к перегрузке мельницы, а с другой – обеспечить производительность замкнутого цикла по готовому классу в рамках действующих технологических карт.

Таким образом, для энергосберегающего управления замкнутым циклом мокрого шарового измельчения остается актуальной задача исключения неполноты информации о состоянии заполнения мельницы измельчаемым материалом. В основу ее решения должен быть положен другой метод определения степени заполнения мельницы рудой. Таким методом может стать имитационное моделирование процессов измельчения.

На сегодняшний день разработана стохастическая модель замкнутого цикла мокрого шарового измельчения [14–17], дающая возможность связать процессы, происходящие в измельчительном агрегате, с параметрами, измерение которых не вызывает затруднений (расходы воды, руды и мощности, отбираемой из сети электродвигателями). Модель позволяет:

- 1) идентифицировать тип руды по вероятности попадания крупного класса в зоны разрушения и распределению вероятностей образования более мелких классов из разрушившейся частицы. Это реализуется путем экспериментального определения максимальной производительности замкнутого цикла по готовому классу для заданных плотностных режимов, при котором заполнение барабана мельницы измельчаемым материалом является оптимальным, а удельный расход электроэнергии – минимальным (базовый режим);
- 2) рассчитать рабочую производительность замкнутого цикла, гарантирующую ис-

ключение переполнения барабана мельницы измельчаемым материалом, рудой идентифицированного типа при различных плотностных режимах (рабочий режим).

Верхний уровень автоматической экспертной энергосберегающей системы управления (рис. 3), построенный на базе стохастической модели, рассчитывает величину задания системе автоматического регулирования подачи исходной руды в загрузочную горловину мельницы, соответствующую рабочему режиму в сложившейся производственной ситуации. Ситуация описывается совокупностью вероятностей, характеризующих тип измельчаемой руды, и плотностными режимами эксплуатации замкнутого цикла измельчения. В базе знаний фиксируются параметры производственной ситуации и величина задания САР подачи исходной руды. Тем самым реализуется возможность повторного использования результатов моделирования при возникновении текущей производственной ситуации в дальнейшем.

Нижний уровень системы состоит из САР, традиционно применяемой для поддержания плотностных режимов эксплуатации замкнутого цикла мокрого шарового измельчения.

Входными данными модели являются расходы руды, песков, воды в мельницу и классификатор, плотность слива классификатора и результаты генерального опробования замкнутого цикла мокрого шарового измельчения, проведенные по специально разработанной методике в базовом режиме работы. Выходным параметром модели является расчетная производительность работы замкнутого цикла в рабочем режиме.

Была проведена апробация стохастической модели в промышленных условиях, которая позволяет утверждать, что она адекватно описывает процессы мокрого шарового

измельчения руды в замкнутом цикле. Сравнительный анализ результатов моделирования с параметрами работы одной из секций Ингулецкого ГОКа показал, что разработанная стохастическая модель рассчитывает производительность замкнутого цикла измельчения с относительной погрешностью не хуже 3,5%. При этом по предварительным расчетам уменьшение удельных затрат электроэнергии за счет поддержания максимально возможной производительности замкнутого цикла по готовому классу составляет от 7 до 10% на тонну измельченной руды.

Необходимо отметить, что эта секция оснащена автоматической системой управления, позволяющей определять оптимальное заполнение барабана мельницы измельчаемым материалом методом измерения параметров акустических характеристик рудно-шарового заполнения. Тем не менее сравнительный анализ позволяет отдать предпочтение разрабатываемой автоматической энергозберігающей системе управления.

В НГУ были выполнены расчеты экономического эффекта для случая использования системы в цикле сухого шарового измельчения и сушки шихты на окомковательной фабрике Полтавского ГОКа. При этом было показано, что снижение удельных затрат электроэнергии может составлять 10–15%, а расхода природного газа – 15–20%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев С. Е., Товаров В. В., Перов В. А. Закономерности измельчения и исчисление характеристик гранулометрического состава. – М.: Металлургия, 1959. – 437 с.
2. Автоматизация технологических процессов на горнорудных предприятиях: Справочное пособие / Под ред. Виноградова. – М.: Недра, 1984. – 167 с.
3. Пивняк Г. Г., Кириченко В. В. Энерго- та ресурсозбереження гірничо-металургійного комплексу України. // Збагачення корисних копалин: Наук. техн. зб. – 2001. – № 11(52). – С. 3–7.
4. Пивняк Г. Г. Горное предприятие как объект энергосбережения. // Горный журнал, 2004. спец. выпуск. – С. 6–10.
5. Пивняк Г. Г., Кириченко В. В. Ресурсозбереження та інтенсифікація процесів подрібнення. – Дніпропетровськ: Національна гірничо академія України, 2001. – 163 с.
6. Кошарский Б. Д., Рабинович Г. А., Красноволец А. В., Ситковский А. Я. Автоматизация обогатительных фабрик. – М.: Недра, 1966. – 412 с.
7. Блюмкин Г. В. Некоторые закономерности и автоматизация регулирования одностадийного замкнутого цикла мокрого измельчения: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Ленинград, 1955.
8. Андреев Е. Е., Кузнецов П. В. Современное состояние автоматизации процессов самоизмельчения руд. // Обогащение руд. – 1972. – № 5. – С. 28–31.
9. Дяконенко В. В. Техническая диагностика процесса измельчения на обогатительных фабриках. // Системы управления горными машинами. – Новочеркасск. – 1979. – С. 63–68.
10. Справочник по обогащению руд черных металлов / С. Ф. Шинкоренко, Е. П. Белецкий, А. А. Ширяев и др. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. С.Ф. Шинкоренко. – М.: Недра, 1980. – 527 с.
11. Марюта А. Н. Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитообогатительных фабриках. – М.: Недра, 1975. – 231 с.
12. Воронов В. А. Синтез систем автоматического управления сложными объектами обогатительной технологии: Дис... д-ра техн. наук. – Ленинград, 1990. – 350 с.
13. Процуто В. С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами обогатительных фабрик. – М.: Недра, 1987. – 253 с.
14. Куваев Г. Н., Куваев Я. Г. Управление мельничными трактами с целью снижения затрат энергии. // Металлургическая теплотехника. Сб-к науч. тр. – Днепропетровск: НметАУ, 2001. – Т. 4. – С. 69–75.
15. Куваев Г. Н., Куваев Я. Г. Имитационная модель замкнутого цикла измельчения // Теория и практика металлургии. – Днепропетровск: РИИ "Днепр – VAL", 2003. – № 2. – С. 21–25.
16. Куваев Г. Н., Куваев Я. Г. Компьютерное моделирование процесса мокрого шарового шарового измельчения руды в замкнутом цикле. // Матер. междунар. конф. "Форум горняков 2005". – Днепропетровск: НГУ, 2005. – Т. 3. – С. 25–31.
17. Кузнецов Г. В., Куваев Г. Н., Куваев Я. Г. Энергозберігающее управление процессом измельчения руды на основе компьютерной стохастической модели. // Матер. Междунар. конф. "Форум горняков 2005". – Днепропетровск: НГУ, 2005. – С. 32–39.