

даною шпаруватістю надходять на керуючі електроди. Після наростання струму в обмотці збудження до значення обмеження  $I_{огр}$  система управління формує позачергові імпульси, що надходять до регулятора. Виникають позачергові замикання силового ключа.

Таким чином система управління робочими режимами електроприводу дозволяє обмежувати на заданому рівні початковий гальмівний струм ТД.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** При роботі рудникового електровозу можливі відхилення напруги живлення від номінального значення, в зв'язку з чим, можуть відбуватися передумови виникнення аварійних режимів, що знижують ефективність роботи рудникового електровозу.

В даний час є ряд рішень, спрямованих на забезпечення безаварійного функціонування електроприводу в умовах знижень і зникнень напруги живлення. Це установка на електровозах спеціальних генераторів напруги, гальмування тягових двигунів при порушенні нормального режиму живлення, застосування контактної-акумуляторних електровозів.

Недоліком таких пристроїв є неможливість підтримки робочого режиму при тривалих порушеннях нормальних умов струмознімання. В результаті цього електропривод стає некерованим, виключається можливість переключення електроприводу в режим гальмування, а в разі потреби екстреного гальмування може привести до аварійної ситуації і є неприпустимим.

### Список літератури

1. **Волотковский С.А.** Рудничная электровозная тяга. -М.: Недра, 1981. - 389с.
2. **Синчук О.Н.** Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Н.Н. Юрченко, А.А. Чернышов, О.А. Удовенко, О.В. Пасько, Э.С. Гузов. Научное издание. – Київ: ІЕДНАУ, 2006. – 252с.
3. **Тихменев Б.Н., Трахтман Л.Н.** Подвижный состав электрифицированных железных дорог. - .М.: Транспорт, 1980. - 471 с.
4. **Алексеев Н.И.** Оптимизация систем электрической тяги в подземных выработках шахт. - М.: Недра, 1979. - 252 с.
5. **Синчук О.Н., Чумак В.В., Ершов О.В.** Импульсные системы управления и защита на рудничном электровозном транспорте. Монография – АДЕФ – Україна, 1998. – 280 с.
6. **Якимец С.Н.** Структура та режими функціонування тягового електротехнічного комплексу двохосових електровозів: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Кременчуг. – 2011.
7. **Проценко Д.** Підвищення енергоефективності керування тяговим двигуном рухомого складу міського електротранспорту/ Дмитро Проценко, Вадим Чуба // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании. – Дніпропетровськ, 2010. – С. 18.
8. **Гаврилов Я.И., Мнацаканов В.А.** Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. - М.: Транспорт, 1986. - 229 с.

Рукопис подано до редакції 28.03.16

УДК 622.7: 658.562

А.И.САВИЦКИЙ, канд. техн. наук, доц., М.А. ТИМОШЕНКО, аспирант  
Криворожский национальный университет

### УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОЦИКЛОНОМ ВТОРОЙ СТАДИИ РУДОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Основными направлениями достижения экономического эффекта в обогащении железной руды является увеличение производительности технологических агрегатов и повышение качества получаемого продукта, что требует комплексной автоматизации обогатительных процессов. Управление обогатительным комплексом требует значительных затрат – дорогостоящего измерительного оборудования и значительных вычислительных мощностей. Кроме того, процесс обогащения железной руды целесообразно рассматривать как распределенную систему, состоящую из отдельных технологических процессов с отдельными системами управления, связанными между собой и влияющими друг на друга. Рассматривая гидроциклон одной, отдельно взятой, второй стадии измельчения можно значительно упростить вычисления и рассмотреть возможные реакции. Таким образом, встает вопрос разработки системы управления, которая учитывала бы рассмотренные аспекты. Решение задачи разработки такой системы управления обуславливает актуальность данной работы. Ее целью является разработка системы управления гидроциклоном второй стадии измельчения с учетом его позиции в иерархии общей системы. Обусловлены основные параметры, влияющие на работу гидроциклона в комплексе с зумпфом и возможные управляющие воздействия. Рассмотрены основ-

ные способы управления технологическим комплексом зумпф-гидроциклон. Разработана система управления рассмотренным технологическим комплексом при детерминированных параметрах. Указаны направления дальнейших исследований – использование современных интеллектуальных средств автоматизации и усовершенствование распределенного управления комплексом обогащения железной руды.

**Ключевые слова:** гидроциклон, зумпф, система управления, мельница, обогащение, распределенные системы, плотность, производительность

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** В условиях конкурентного рынка основным направлением развития производства есть снижение себестоимости продукции. Она достигается с помощью комплексной оптимизации производственных процессов на основе внедрения инновационных технологий. Существующий мировой опыт свидетельствует, что повышение уровня автоматизации технологических процессов – основное направление в решении вопроса ресурсоэффективности.

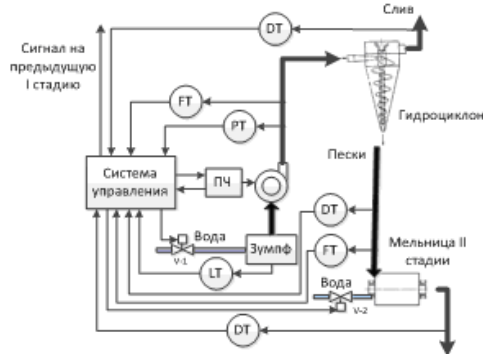
**Анализ исследований и публикаций.** С ростом количества управляемых механизмов и датчиков, усложнением алгоритмов управления более эффективным становится применение распределенных систем. Обогащительный процесс является достаточно сложным и трудоемким, если рассматривать его с точки зрения автоматизированного управления, и это обуславливает необходимость децентрализации управления и декомпозиции при анализе в смысле системного подхода по отношению к общей технологической задаче всех стадий. Данный подход позволит достигнуть большего быстродействия, благодаря распределению задач между параллельно работающим оборудованием, большую устойчивость к сбоям и более простую реконфигурацию, и модернизацию системы в будущем [1,2].

При эффективной работе системы автоматического управления гидроциклоном оптимизируются качественные и количественные параметры потоков со снижением себестоимости концентрата в целом. Регулирование гидроциклона направлено на достижение двух целей: количественной (продуктивность по готовому продукту) и качественной (эффективность разделения и гранулометрический состав).

**Постановка задачи.** По технологическим требованиям к гидроциклонам требуется постоянное регулирование количества твердого в пульпе при помощи подачи технологичной воды в зумпф. Из-за постепенного изменения концентрации твердой фазы, неопределенного изменения гранулометрического состава и минералогических свойств сырья происходит колебание свойств пульпы. Это колебание обуславливает изменять давление подачи пульпы в гидроциклон. Изменения этого давления производится при помощи частотно-регулируемого привода насоса [3].

**Изложение материала и результаты.** Ранее [4] была рассмотрена система управления процессом обогащения на основе применения средств нечеткой логики. Рассмотрим отдельно процессы разделения в гидроциклоне второй стадии.

В технологических схемах обогащительных фабрик, во второй стадии, обычно применяют несколько гидроциклонов (каждый со своим приводом). Мы будем считать, что остальные гидроциклоны загружаются полностью согласно проектным нормам, и колебание производительности стадии происходит только в пределах производительности одного гидроциклона. Схема управления представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема управления гидроциклоном во второй стадии обогащения

Система управления включает в себя датчики плотности DT, измеряющие плотности слива и песков  $\rho_{сл}$  и  $\rho_{п}$ ; датчик уровня LT, измеряющий высоту уровня пульпы в зумпфе гидроциклона  $h$ ; расходомеры FT, отражающие производительности по пескам и по сливу ( $Q_{п}$  и  $Q_{сл}$ ) и манометр PT для измерения напора насоса гидроциклона P. Также с помощью преобразователя частоты (ПЧ) отдельно обрабатываются данные о скорости вращения двигателя насоса.

На основе собранных данных система управления рассчитывает значение управляющего воздействия. Управление осуществляется добавлением воды в зумпф, при необходимости, и

регулюванням швидкості обертання двигача насоса гідроциклона з допомогою преобразовача частоти.

Основой управління являється підтримання співвідношення продуктивностей по сливу і по піскам на визначеному рівні. Это виражається критерієм

$$K = Q_{сл}/Q_{п}; \rho_{сл} \leq \rho_{сл.н}; \rho_{п} \geq \rho_{п.н} \quad (1)$$

Підтримання цього критерія на оптимальному рівні забезпечує виможене розділення в гідроциклона. Известно [5,6], что на ефективність розділення при постійності інших параметрів впливає швидкість подачі матеріалу в гідроциклон. Сама ж швидкість подачі напряму залежить від напора насоса Р. Залежності загальної продуктивності гідроциклона і вихода пісків від напора насоса гідроциклона показані вони на рисунку 2. К<sub>п</sub> – розрахунковий коефіцієнт вихода твердого в піски (% или доли ед.).

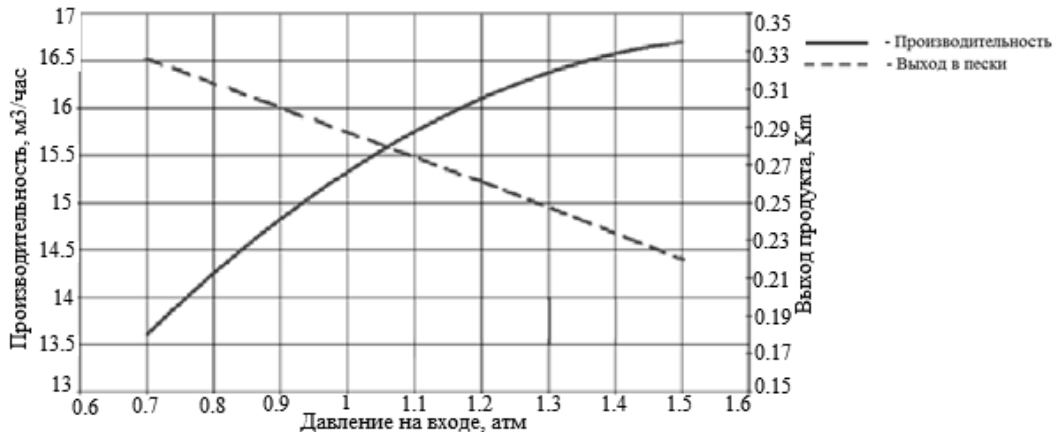


Рис. 2. Залежність продуктивності та виходу пісків від тиску на вході

Из графіків видно, что з ростом потужності насоса зростає також продуктивність і при оптимальному режимі потужності насоса продуктивність досягає піка, но при дальнішому збільшенні швидкості обертання насоса його потужність буде зростати, і пульпа на вход гідроциклона буде подаватися з ще більшим тиском, что негативно впливатиме на ефективності розділення. При занадто високому тиску на вході, початкова швидкість руху частинок в гідроциклона буде занадто високою, что впливатиме на рух пульпи – зміниться діаметр повітряного столба, піскава насадка буде забиватися шламом, а в слив же не буде уходити практично нічого [7].

Таким образом, следует поддерживать напор насоса в некотором оптимальном диапазоне. Но также необходимо учитывать уровень пульпы в зумпфе гидроциклона. Он не должен быть выше допустимого, но также он не должен быть слишком низким, так как в таком случае насос «захлебнется» и возможен срыв работы гидроциклона. Поэтому, кроме регулирования скорости вращения двигателя насоса, необходимо также поддерживать уровень пульпы в зумпфе. С этой целью регулируется количество добавочной воды Q<sub>в</sub> через клапан V-1. Также с помощью клапана V-2 регулируется подача дополнительной воды в мельницу.



Рис. 3. Алгоритмічна структурна схема системи управління при детермінованих параметрах

При управлении с детерминированными параметрами, требуемые управляющие воздействия рассчитываются с помощью формул. Для объемной производительности гидроциклона часто применяют зависимость Поварова:

$$Q = 5K_d K_\alpha d_{num} d_{cl} \sqrt{gP}, \quad (2)$$

где  $K_d K_\alpha$  – табличные коэффициенты, зависящие от диаметра и угла конусности гидроциклона;  $K_d K_\alpha$  – диаметры питательной и сливной насадки;  $g$  – ускорение свободного падения;  $P$  – давление на входе.

Данный подход позволяет получить лишь приблизительные средние значения, так как большинство параметров применяется усреднено и не учитывает динамику работы гидроциклона как технологического механизма. Потому более целесообразным будет использование современных эмпирических методов интеллектуальных средств, которые позволят измерить производительность с учетом ее изменений во времени.

При исследовании песков гидроциклонов нового поколения, используют зависимость производительности по пескам [8]

$$Q_n = Q \frac{\gamma_n C_{me} + 100\delta_\varepsilon C_\varepsilon}{360\rho_{me} C_{me}}, \quad (3)$$

где  $Q$  – производительность по твердому,  $\rho_{me}$  – плотность твердого,  $C_{me}, C_\varepsilon$  – объемное содержание твердого и воды в питании;  $\gamma_n$  – выход песков, %;  $\varepsilon_\varepsilon$  – извлечение воды в пески.

Большинство указанных параметров задается таблично на основе эмпирических знаний. Таким образом, учитывается давление на входе гидроциклона и влияние его на желаемый результат. Но, как и предыдущая формула, данный подход не дает возможности контроля динамических изменений. Кроме того, некоторые параметры тяжело поддаются измерению и требуют внедрения в систему дорогостоящих датчиков. Это обуславливает необходимость выведения новых зависимостей и их использования в интеллектуальных системах. Уровень пульпы в зумпфе контролируется при помощи поплавковых и радиологических датчиков уровня.

Предложенная система управления состоит из нескольких взаимосвязанных контуров, показанных на рис. 3. В контуре регулирования расхода пульпы, подающейся через двигатель в гидроциклон ( $F_{об}$ ) подается задающее воздействие  $U_{F_{об}}$  и, с учетом отрицательной обратной связи (блок «ОС расход дв.»), поступает на регулятор  $P_{об}$ . Далее воздействие подается на преобразователь частоты (ПЧ), двигатель (Д) и насос (Н). База нечетких правил находится в блоке «f» и именно она определяет реакцию на величину расхода входного материала через двигатель и регулирует расход песков (F гц.) через гидроциклон (ГЦ). Данный контур регулирования тесно связан с контуром регулирования расхода пульпы, имеет свои обратную связь и регулятор. Учитывая, что пульпа может засорить пульпопровод (засохнуть при аварийном отключении, например), диаметр его проходимой части может уменьшиться и для поддержания нужного напора, придется увеличить скорость вращения двигателя. Это реализовано контуром длительной коррекции через обратную связь «ОС коррекции». При регулировании плотности песков  $\rho$  учитывается требование к конечному продукту. Если требуется качество, то производительность пульпы с предыдущей стадии ( $Q_{1 \text{ стадии}}$ ) считается постоянной и управление происходит через контур регулирования добавочной воды.  $Q_{1 \text{ стадии}} = const, mo \quad \rho = f(Q_w)$ . Если же в приоритете количество продукта, то количество добавочной воды считается постоянным и в расчет берется производительность предыдущей стадии.  $Q_w = const, mo \quad \rho = f(Q_{1 \text{ стадии}})$ . Вы-

бор метода регулирования производит логическое устройство.

На скорость подачи пульпы в гидроциклон также существенно влияет форма питающей насадки и угол, под которым она подает материал в механизм [9] и есть модели гидроциклонов, позволяющие регулировать этот угол. Таким образом, совместив эти способы регулирования скорости подачи материала в гидроциклон, можно добиться оптимальных результатов. Чрезмерное повышение производительности насоса гидроциклона (которое влечет за собой повы-

шенное потребление электроэнергии) можно компенсировать изменением угла наклона питающей насадки и наоборот. Существуют конструкции гидроциклонов, имеющие регулируемые или сменные песковые насадки различных размеров. С их помощью можно контролировать плотность и крупность песков и, таким образом, влиять на эффективность разделения. В горнорудной промышленности они не нашли широкого применения из-за высокой абразивности твердых железорудных пород [10].

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Полученные результаты позволяют сказать, что рассмотрение обогатительного комплекса как децентрализованной системы, состоящей из отдельных технологических механизмов с собственными системами управления, дает возможность более эффективно управлять процессом в целом, экономя время и вычислительные ресурсы. Для более эффективного управления гидроциклоном второй стадии измельчения следует более подробно рассмотреть вопрос связи с объектами предыдущих и последующих стадий и применить современные интеллектуальные средства автоматизации.

#### Список литературы

1. **Савицкий О.И.** Управління багатостадійним збагаченням магнетитових руд за умов неповної інформації / О.И. Савицкий, В.П. Корж, С.Л. Цвіркун // Науково-дослідницький і проектний інститут «МЕХАНОБРЧЕРМЕТ». Новое в технологии и технике переработки минерального сырья. Збірник наукових праць. – Кривий Ріг –2011, С.126-135
2. **Bass L.** Contribution to the theory of grinding processes / L. Bass, Z. Angew / Math. Phys. – 1954 – no 5. – pp. 283–292.
3. **Ragot J.** Transient study of a closed grinding circuit / [Ragot J., Roesch M., Degoul P., Berube Y.] — 2-nd IFAC Symp. "Automat. Mining, Miner. and Metal. Proc." – Pretoria. – 1977.- P. 129-142.
4. **Morkun V.** Optimization of the second and third stages of grinding based on fuzzy control algorithms / V. Morkun, O. Savitskiy, M. Tymoshenko. // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – №8. – P. 22–25.
5. **Поваров А.И.** Гидроциклоны на обогатительных фабриках. М., «Недра», 1978, 232 с.
6. **Grainger-Allen T. J. N.** Bubble generation in froth flotation machines – Trans. Inst. Mining Met., 1970, vol. 79, p. 15-2
7. **Liudmyla Yefimenko, Mykhailo Tykhanskyi.** Information systems in the technological processes automatic control development by technical condition criterion. Metallurgical and Mining Industry, 2015, No1, p.p. 28 – 31.
8. **Торопов О.А.** Расчет параметров гидроциклонов нового поколения / О.А. Торопов // Горный журнал. – 2008. – №6. – С. 105-108.
9. **Schubert. H.** Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. – Leipzig, 1967, Bd. 11, p. 472.
10. **Моркун В. С.** Энергоэффективное автоматизированное управление процессом обогащения руды с распознаванием ее технологических разновидностей / В. С. Моркун, В. В. Тронь, С. А. Гончаров, Н. С. Подгородецкий. – Кривой Рог, 2014. – 326 с.

Рукопись поступила в редакцию 07.04.16

УДК 65.011.56: 622.7.01

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф.,  
Н.В. МОРКУН, В. В. ТРОНЬ, кандидаты техн. наук, доц.,  
Криворожский национальный университет

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ЯДЕРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВОЛЬТЕРРА-ЛАГЕРРА

В статье приведены результаты исследования методов идентификации нелинейных объектов управления обогатительного производства на основе ядерного преобразования Вольтерра-Лагерра в условиях неустойчивости характеристик поступающего на переработку железорудного сырья. Рассмотрены методы определения коэффициентов Лагерра при формировании модели процессов переработки железорудного сырья.

**Ключевые слова:** автоматизация, обогащение руд, модель Вольтерра-Лагерра

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** В условиях роста цен на энергетические ресурсы важнейшим вопросом управления горнорудными предприятиями становится снижение себестоимости и энергоемкости технологических процессов добычи и переработки сырья. Одним из крупнейших потребителей энергии на предприятиях данного типа является рудообогатительная фабрики, на долю которой приходится более 20 % расходуемой