

тепловий режим доменного виробництва залежить не тільки від протікаючих у ньому процесів, а й від зовнішніх факторів таких як нагрів дуття, склад поступаючої шихти та інше; передбачення поведінки системи дає можливість уникнути невизначеностей і знизити обчислювальну похибку, а також зробити технологічний процес біль продуктивним та якісним.

У подальшому є актуальним створення і розвиток систем автоматичного керування на основі нечіткої логіки, які змогли б безпосередньо застосовувати якісно сформульовані експертні знання для генерування управляючих дій на об'єкт управління.

#### Список літератури

1. <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2009/kita/rogozhkin/diss/indexu.htm>
  2. **Mamdani E.H., Assilian S.** An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller // Int. J. Man-Machine Studies, 1975. - Vol. 7. - №1. - P. 1-13.
  3. **Гулина И.Г.** Адаптивная САУ сложным многосвязным объектом управления с интеллектуальным прогнозированием // И.Г. Гулина, В.И. Корниенко // Системы обработки информации, 2011. – Вип.87. – С. 57-62. – ISSN 1681-7710ю
  4. **Корниенко В.И.** Обоснование принципов построения систем управления тепловым состоянием доменной печи // В.И. Корниенко, И.Г. Гулина // Научный вестник Национального горничого университета, 2011. – № 4. – С.111-115. – ISSN 2071-2227.
  5. **Корниенко В.И.** Методология побудови інтелектуальних прогнозуючих систем оптимального керування нелінійними технологічними процесами / В.И. Корниенко, И.Г. Гулина // Гірничая електромеханіка та автоматика. – 2010. – Вип. 85. – С. 75-82.
  6. **Гостев В.И.** Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления [Текст] / Гостев В.И. – К.: «Радиоаматор», 2008г., – 972 с.
  7. **Штовба С.Д.** Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / Штовба С.Д. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007г., – 288 с.
  8. **Мирошник И. В.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами [Текст] / Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. – СПб.: Наука, 2000г., – 549 с.
  9. **Бобцов А.А.** Методы адаптивного и робастного управления нелинейными объектами в приборостроении [Текст] : учеб. пособие. / Бобцов А.А., Никифоров В.О., Пыркин А.А. [и др.] – СПб: НИУ ИТМО, 2013г., –277 с.
  10. **Попович М.Г.** Теория автоматического керування: Підручник [Текст] / Попович М.Г., Ковальчук О.В., – К.: Либідь, 1997р., – 533 с.
  11. **Terano T., Asai K., Sugeno M.,** Fuzzy Systems Theory and its Applications, Academic Press, London 1992.
  12. **Takagi T., Sugeno M.,** Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1985, vol. 15, s. 116-132.
  13. **Леоненков А.В.** Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / **А.В. Леоненков** – СПб.: БХВ-Петербург, 2005., – 736 с.
  14. **Заде Л.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений /Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 166 с.
  15. **Круглов В.В., Борисов В.В.** Искусственные нейронные сети. Теория и практика / **В.В. Круглов, В.В. Борисов.** – М.: Горячая линия - Телеком, 2001., – 382 с.
  16. **Mamdani E.H., Assilian S.** An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller // Int. J. Man-Machine Studies. - 1975. - Vol. 7. - №1. - P. 1-13.
- Рукопис подано до редакції 09.04.16

УДК 622.7: 658.562

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

### НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОЦИКЛОНОМ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ ПАРАМЕТРАХ

Обогащение является комплексным сложным процессом и преследует достижение трех различных целей – повышения производительности, повышение качества конечного продукта и снижение энергозатрат. Для достижения этих целей рационально применять распределенное управление к обогатительному комплексу, что позволит рассматривать каждый его механизм по отдельности и в контексте работы общей системы. При этом целесообразно использование современных интеллектуальных способов автоматизированного управления: оптимальное и адаптивное управление, средства искусственного интеллекта, нечеткой логики, генетические алгоритмы, гибридные модели. Исследования показывают, что нечеткое управление гидроциклоном второй стадии измельчения позволяет учитывать множество зависимостей и вырабатывать управляющие воздействия, зависящие от многих параметров. Кроме того, данный подход позволяет работать в условиях неопределенных параметров. Представленная система управления самообучается и самонастраивается, а также учитывает связь с предыдущей и последующей стадией измельче-

ния, влияя на общую распределенную систему. Дальнейшие исследования предполагают более глубокое исследование связи между механизмами различных стадий измельчения и их влияния на конечный результат системы этого процесса.

**Ключевые слова.** Гидроциклон, обогащение, система управления, распределенные системы, нечеткая логика, системный подход.

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** Экономическое развитие Украины сильно зависит от работы горно-металлургического комплекса. Именно продукция металлургических и горно-обогащительных комбинатов составляет значительную долю от экспорта.

Однако на конкурентоспособность отечественной продукции влияет ряд проблем: низшее, чем у потенциальных конкурентов, качество; высокая энергоемкость; слишком большие потери полезного компонента в хвостах. Также на себестоимость продукта негативно влияют постоянное увеличение глубины карьеров и постепенное снижение запасов богатых руд, что приводит к увеличению доли бедных и сложнообогащаемых руд в обработке [1-4].

Обогащительный комплекс включает в себя многие технологические агрегаты, совершающие различные операции и отличающиеся по конструкции, которые соответственно требуют применения различных подходов при построении и реализации систем управления. Кроме того, обогащительные аппараты пребывают во взаимосвязи и непосредственно влияют на работу друг друга; требуют применения многих измерительных приборов, фиксирующих величины различной физической природы, что приводит к увеличению требуемых вычислительных мощностей

**Анализ исследований и публикаций.** Существуют разные пути решения поставленных вопросов, например, модернизация технологии, однако это требует значительных капиталовложений. Одним из наиболее перспективных средств улучшения вышеуказанных показателей является комплексная автоматизация управления технологических процессов рудообогащительных фабрик на основе использования систем интеллектуального, оптимального и адаптивного управления [5-7].

Управление процессом обогащения требует комплексного подхода и учета множества факторов. Поскольку весь процесс обогащения можно рассматривать как распределенную систему [8], задача несколько упрощается, из-за того, что появляется возможность разрабатывать системы управления для каждого механизма в каждой стадии по отдельности с учетом оптимальных параметров. Но, даже рассматривая отдельный механизм, сталкиваемся с проблемой сложности управления им.

**Постановка задачи.** К примеру, рассмотрим гидроциклон второй стадии обогащения - сложный объект, модель которого трудно адекватно описать математически, не допуская слишком много упрощений. Необходимость получения как можно более плотных песков, при этом, с как можно более высоким содержанием полезного компонента и, с учетом максимизации производительности, требуют рассмотрения многих параметров работы агрегата и применения большого количества дорогостоящего измерительного оборудования (в том числе и датчиков) для сбора и обработки этих параметров.

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).

Кроме того, гидроциклон нецелесообразно рассматривать отдельно от зумпфа, связанного с предыдущей стадией измельчения, и это также увеличивает количество рассматриваемых параметров при управлении технологическим механизмом. Система автоматического управления сложного объекта должна создаваться на основе алгоритмов, которые не требуют подробной априорной информации об объекте управления [9-12].

Именно сложность составления математической модели гидроциклона и обуславливает применение современных интеллектуальных средств, в том числе средств нечеткой логики.

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

**Изложение материала и результаты.** В статье [13] осуществлялось управление обогатительной линией с применением средств нечеткой логики, и были разработаны соответствующие правила. Рассматривая гидроциклон как самостоятельную часть общей распределенной системы, необходимо разработать для него собственную базу данных правил нечеткой логики, применимую к нему, как к отдельному объекту.

Основной целью управления технологическим объектом является достижение некоторых количественных и качественных показателей. Для гидроциклона основные количественные показатели – это производительность по сливу и по пескам, а качественные – плотности песка и слива, количество полезного компонента [14,15].

Критерием управления является поддержание баланса производительностей по сливу и по пескам на оптимальном уровне [13]:

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

В предложенной системе управления есть четыре входных значения - уровень пульпы в зумпфе  $h$ , коэффициент соотношения производительностей по сливу и по пескам  $K$ , и плотности слива и песков  $\rho_{сл}$ ,  $\rho_{п}$ . После логического вывода на выходе системы возникают три управляющих воздействия - регулирования подачи воды в зумпф  $W$ , скорости вращения насоса  $P$  и управляющий сигнал на первую стадию обогащения (в другую часть общей распределенной системы).

Входные и выходные величины имеют по пять термов, соответственно «очень мало», «мало», «средне», «много» и «очень много». Поддержание уровня пульпы в зумпфе осуществляется следующими правилами (в формате подачи правил в среде Matlab). Если уровень  $h$  низкий, то требуется повысить подачу воды  $W$ : «*IF (h is мало) THEN (W is много)*». Если же уровень высокий, то следует наоборот снизить объем добавочной воды, а при его дальнейшем увеличении еще и увеличить скорость насоса, чтобы быстрее откачивал пульпу: «*IF (h is много) THEN (W is мало)*» и «*IF (h is очень много) THEN (W is мало) AND (P is много)*».

Коэффициент  $K$  отражает отношение производительности гидроциклона по сливу к производительности по пескам. Если  $K$  высокий, то производительность по сливу сильно превосходит производительность по пескам. Это значит, что входная скорость подачи пульпы в гидроциклон слишком высокая, образующийся воздушный столб занимает большую площадь песковой насадки (или полностью ее перекрывает) и большая часть продукта уходит в слив. Чтобы исправить ситуацию, необходимо уменьшить скорость насоса, чтобы снизить скорость подачи пульпы: «*IF (K is много) THEN (P is мало)*». Если же  $K$  низок, то выход песков высок в сравнении с выходом слива. В обычных условиях как раз и требуется получить пески большой плотности, но если в слив не уносится шлам, то нужно также исправлять ситуацию – повысить скорость насоса: «*IF (K is очень мало) THEN (P is много)*».

Примеры указанных правил указаны в табл. 1 в соответствии с общепринятыми нормами обозначения ( $L$  - очень мало,  $LM$  - мало,  $M$  - средне,  $MH$  - много,  $H$  - очень много). Первые четыре колонки обозначают измеряемые величины, две последние - управляемые.

Таблица 1

Фрагмент применяемых правил нечеткой логики в системе управления

| $h$ | $K$ | $\rho_{сл}$ | $\rho_{п}$ | $\Rightarrow$ | $W$ | $P$ |
|-----|-----|-------------|------------|---------------|-----|-----|
| LM  | -   | -           | -          | $\Rightarrow$ | MH  | -   |
| MH  | -   | -           | -          | $\Rightarrow$ | LM  | -   |
| H   | -   | -           | -          | $\Rightarrow$ | L   | MH  |
| -   | MH  | LM          | MH         | $\Rightarrow$ | M   | LM  |
| -   | L   | -           | LM         | $\Rightarrow$ | LM  | MH  |

Структура нечеткого регулятора изображена на рис. 1.

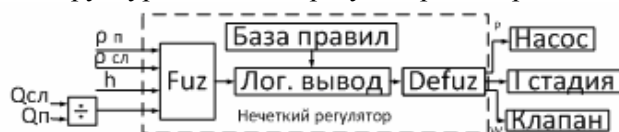
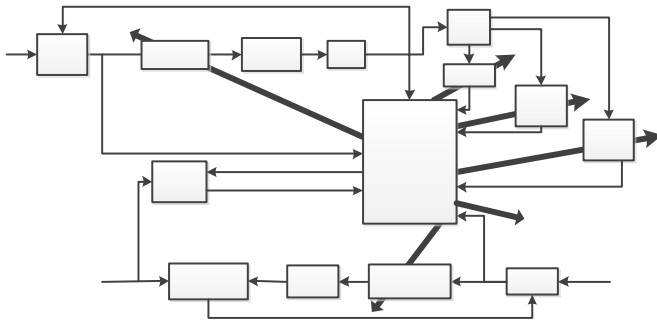


Рис. 1. Структура нечеткого регулятора

При адаптивном подходе к построению нечетких систем управления настройка блоков нечеткого логического вывода осуществляется не только в процессе проектирования, но и во время нормальной эксплуатации системы, параллельно с процессом управления объектом. Адаптивные системы по-

зволяют осуществлять более качественное управление сложными, как в нашем случае, нестационарными объектами по сравнению с обычными системами. В схеме на рис. 2 используются контроллеры обратной связи, выполненные на нечетких сетях НС1 и НС3, обучающихся через идентификатор НС2. Обучение через идентификатор, а не непосредственно на объекте, необходимо, чтобы «не мешать» нормальному функционированию объекта пробными воздействиями, используемыми для обучения [16]. К недостаткам схемы можно отнести высокие требования к вычислительным ресурсам. Предложенная система управления выглядит, как показано на рис. 2.



**Рис. 2.** Алгоритмическая структурная схема системы управления при неопределенных параметрах

На рис. 2 приняты следующие обозначения: ПЧД - преобразователь частоты двигателя; Н - насос; ГЦ - гидроциклон; НС - нечеткие сети; V-1 - клапан; Sum - сумматор.

НС1 на основе сигнала ошибки  $e_1$ , полученной из расхождения задающего сигнала  $U F_{дв}$  и сигнала двигателя  $F_{дв}$ , вырабатывает управляющее воздействие на ПЧД. Сигнал задания уровня пульпы в зумпфе  $U h$  вместе с реально полученным сигналом  $h$  дают ошибку  $e_2$ , поступающую на НС3, которая управляет клапаном V-1 и, соответственно, подачей технологической воды в зумпф. Уровень пульпы в зумпфе регулируется также в соответствии с производительностью предыдущей первой стадии  $F_{1ст}$ . Ошибки расхождения  $e_3, e_4$  и  $e_5$ , полученные на границах задающих воздействий и измеренных на выходах гидроциклона параметров плотностей по пескам и по сливу ( $\rho_{пс}$  и  $\rho_{сл}$ ) и коэффициента соотношения производительностей по сливу и по пескам (КГЦ) также поступают на НС2, как и ранее рассмотренные  $e_1, e_2$  и  $e_6$ . На основе сигналов ошибок НС2 обучает НС1 и НС3 и отправляет сигнал на НС первой стадии (на рис. 2 жирные линии).

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Предложенная схема управления гидроциклоном второй стадии обогащения позволяет повысить эффективность разделения, повышая плотность на его выходе за счет регулирования подачи входного материала в гидроциклон, а именно скорости его подачи при поддержании постоянного уровня пульпы в зумпфе гидроциклона. Из-за колебаний характеристик потока пульпы наиболее приемлемой системой регулирования является система с нечетким алгоритмом. При достижении экстремальных значений регулируемых параметров второй стадии, вырабатывается корректирующий сигнал на параметры пульпы подающейся из первой стадии обогащения. Направлениями дальнейших исследований являются усовершенствования связей с механизмами предыдущей и последующей стадий.

*Список литературы*

1. **Богданов О.С.** Справочник по обогащению руд. Том II Обогащительные фабрики / Под ред. О. С. Богданова, 2-е изд., перераб и доп. - М.: Недра, 1984. - 360 с.
2. **Троп А. Е.** Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик: Учебник для вузов / А. Е. Троп, В. З. Козин, Е. В. Прокофьев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1986. - 303 с.
3. **Хан А. Г.** Автоматизация обогатительных фабрик / А. Г. Хан, В. П. Картушин, Л. В. Сорокер, Д. А. Скрипчак. - М.: Недра, 1974. - 280 с.
4. **Sbarbaro D.** Advanced control and supervision of mineral processing plants / D. Sbarbaro, R. del Villar., 2010. - 311 p.
5. **Поваров А.И.** Гидроциклоны на обогатительных фабриках. М., «Недра», 1978, 232 с.
6. **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.
7. **Bass L.** Contribution to the theory of grinding processes / L. Bass, Z. Angew / Math. Phys. - 1954 - no 5. - pp. 283 - 292.
8. **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.
9. **Gurocak H.B.** Fuzzy rule base optimization of a compliant wrist sensor for robotics // J. Robotic Systems. 1996. № 13. P. 475-487.

10. Wang L.-X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems // IEEE Trans. Fuzzy Systems 1993. № 1 (2). P. 146–155.
  11. Spooner J.T., Passino K.M. Stable adaptive control using fuzzy systems and neural networks // IEEE Trans. Fuzzy Systems. 1996. № 4 (3). P. 339–359.
  12. Schubert. H. Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. – Leipzig, 1967, Bd. 11, p. 472.
  13. Morkun V. Optimization of the second and third stages of grinding based on fuzzy control algorithms / V. Morkun, O. Savytskyi, M. Tymoshenko. // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – №8. – P. 22–25.
  14. Торопов О.А. Расчет параметров гидроциклонов нового поколения / О.А. Торопов // Горный журнал. – 2008. - №6. – С. 105-108.
  15. Тихонов О. Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1984. – 208 с.
  16. Усков А.А. Принципы построения систем управления с нечеткой логикой // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. 2004. № 6. С. 7-13.
- Рукопись поступила в редакцию 08.04.16

УДК 681.51: 622.788

К.В. ЛОБОВА, студентка, Криворізький національний університет

## МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ КОТУНІВ НА КОНВЕЄРНІЙ ВИПАЛЮВАЛЬНІЙ МАШИНИ ЗА МЕТОДОМ ЗВОРОТНОГО ЯКОБІАНА

Показано, що для підвищення продуктивності конвеєрної випалювальної машини і якості котунів ефективним є впровадження для цієї мети комп'ютеризованих систем керування технологічним процесом опалу котунів, що в своєму складі використовують спеціальні моделі. Тому запропоновано для керування термічною обробкою котунів на конвеєрній випалювальній машині використати модель автоматизованої системи керування, яка ґрунтується на методі зворотного якобіана.

Згідно з методом зворотних операторів при синтезі систем автоматизованого керування випалювальної машини побудована система пристроїв, що реалізують потрібне перетворення. Такі перетворення зворотні тим, які здійснюються над відповідними змінними в самому об'єкті та в додаткових вимірювально-обчислювальних пристроях, що порівнюють. Для цього синтез системи автоматизованого керування випалювальної машини за методом зворотних операторів запропоновано виконати на алгоритмічній системі управління, яка дозволяє простежити алгоритм перетворення змінних. Усе це дозволило побудувати структурну схему системи автоматизованого керування випалювальної машини за методом зворотного оператора. Ця схема представлена пристроями неузгодження і перетворення та задатчиком вхідних параметрів, які представляються квазізворотною моделлю конвеєрної випалювальної машини.

Розроблена автоматизована система керування має модель об'єкту і квазізворотну модель, які описуються системою диференціальних рівнянь. Передбачається побудова локальної самоналагоджувальної за поточними значеннями параметрів моделі. Вказано, що алгоритм керування конвеєрною випалювальною машиною за методом зворотного оператора, як це видно з наведеного аналізу, вимагає отримання зворотних матриць.

**Ключові слова:** конвеєрна випалювальна машина, котуни, структурна схема, модель об'єкту, матриця, квазізворотна модель, зворотній якобіан.

**Постановка проблеми.** Автоматизація контролю та керування є одним із способів підвищення продуктивності конвеєрної випалювальної машини (КВМ) і поліпшенню якості котунів. Найбільш ефективними є впроваджені в останні роки системи комплексної автоматизації агрегатів і механізмів КВМ. Для розробки та впровадження цих систем необхідно ретельне вивчення процесу, а також їх дослідження, як об'єктів автоматизації. Тому проведення досліджень в області створення ефективних методів та засобів автоматизації процесу випалу котунів на конвеєрній випалювальній машині є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Загальновідомо, що для керування термічною обробкою котунів на КВМ використовуються різні моделі [1-3]. Для підвищення продуктивності КВМ і якості котунів ефективним є впровадження для цієї мети комп'ютеризованих систем керування технологічним процесом випалювання котунів, що в своєму складі використовують спеціальні моделі [7].

Саме відомі моделі дозволяють керувати технологічним процесом в окремих зонах КВМ [8]. При цьому не в повній мірі враховуються впливи сусідніх зон [9], зміни швидкості переміщення палет, якість палива, теплогазообмін, тощо [13].

Відомий також метод зворотного якобіана, який має широке застосування для синтезу систем управління технологічними об'єктами [4-6,10-12]. Цей метод виявляється зручним тим, що