

УДК 622.7-52:62-50

**В.П. ХОРОЛЬСЬКИЙ** д-р. техн. наук

(Украина, Кривой Рог, Криворожский экономический институт КНЭУ),

**Е.К. БАБЕЦ** канд. техн. наук

(Украина, Кривой Рог Криворожский технический университет)

## ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭНЕРГОЕМКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК

**Введение.** При внедрении современных распределенных систем адаптивного управления обогатительными фабриками возникает необходимость выделения встроенных подсистем контроля и диагностики состояния электромеханического и технологического оборудования (шаровых мельниц синхронных двигателей, гидроциклонов – песковых насосов – асинхронных двигателей). Такое сочетание контроля работоспособности технологического оборудования обогатительной фабрики позволяет обеспечить высокие показатели их надежности и работоспособности и учета этих показателей при оперативном планировании производительности технологических линий и обогатительной фабрики, оптимизации организации ремонтов оборудования [1].

В процессе работы электромеханического и технологического оборудования могут наступить такие периоды, когда эксплуатация его становится экономически невыгодной. Сложность определения действительного состояния работоспособности оборудования заключается в том, что различное оборудование обогатительной фабрики в разной степени подвергается старению и износу в процессе работы и в разной степени влияет на снижение общих характеристик качества функционирования. Различными аспектами этой проблемы посвящено значительное количество работ отечественных авторов. Так в работах [2, 3] рассмотрены разнообразные задачи диагностирования технологического оборудования обогатительных фабрик, предложены встроенные системы контроля работоспособности оборудования, разработаны теоретические положения живучести и надежности систем [4, 5]. Под этими важными понятиями в условиях трансформационной экономики понимают: живучесть – возможность управления технологическим процессом при неисправностях в системе управления или технологических агрегатах, с помощью которых производят продукцию; надежность – исключение аварийных ситуаций.

Технологические процессы и обогатительные агрегаты (шаровые мельницы, классификаторы, гидроциклоны, магнитные сепараторы, флотационные машины) характеризуются как последовательным, так и параллельным включением, и образуют технологические стадии с рециклами, повышающие живучесть и надежность систем [5].

## Автоматизация та управління процесами збагачення

Из теории и практики автоматического управления известно, что живучесть определяется внутренними свойствами объекта управления, а поэтому системы оценки живучести могут быть построены в качестве встроенных в процесс систем интеллектуального управления.

**Постановка задачи.** В настоящей работе сделана попытка решить задачу диагностики и контроля работоспособности энергоемкого технологического оборудования обогатительных фабрик путем разработки специализированных экспертных диагностических систем с привлечением основных положений теории распознавания образов.

**Методы исследований.** Задача автоматического анализа работоспособности технологических линий обогащения руды разбивается на две взаимосвязанные подзадачи:

- прогноз времени работоспособности оборудования по данным его нормальной эксплуатации;
- выявление (распознавание) аварийных состояний, ситуаций и аварий и их предотвращение.

Предположим, что поведение технологической линии есть некоторая функция  $\xi(t)$  времени в  $n$ -мерном пространстве параметров  $\{x\}$ . Выделим в пространстве параметров  $\{x\}$  подпространство  $x_i$  размерностью  $k \leq n$ , причем параметры  $x_i \in \{x_i\}$  зависят от показателей работоспособности оборудования технологической линии, например, от длительности исправной работы после момента начала эксплуатации оборудования. Параметры, входящие в  $\{x_i\}$  будем называть определяющими траекторию работоспособности технологической линии. Тогда траекторией нормальной работы технологической линии будет такая функция  $\xi_k(t)$ , определенная на интервале  $(t_0, t_k)$ , где  $t_0$  – время начала эксплуатации линии;  $t_k$  – момент отказа на одном из технологических агрегатов линии. Очевидно, что траектории различных технологических агрегатов линии переработки руды одного и того же типа (например, шаровых мельниц) будут несколько отличаться друг от друга.

Выберем для технологической линии среднее время ее работоспособности  $(t_0 < T < t_k)$  и поставим в соответствие множеству значений  $\xi_k(t)$  на интервале  $(t_0, T)$  число  $t_k - T$ , определяющее период нормальной работы линии после момента  $T$ . Нахождение способов определения  $(t_k - T)$  по известным значениям  $\xi_k(t)$ ,  $t < T$  для технологической линии и является задачей определения ее работоспособности.

Разобьем интервал  $t_{k_{\max}} - T$  на несколько периодов и поставим в соответствие числу  $(t_k - T)$  номер класса, в который попало это число периодов, например,  $S_1, S_2, \dots, S_n$ . Тогда каждый период  $S_1, S_2, \dots, S_n$  можно

## Автоматизация та управління процесами збагчення

отождествить с понятием образа, которому отвечает определенный временной интервал работоспособности линии в соответствии с  $j$  номером,

$$J = 1, 2, 3, \dots, k.$$

При таком подходе прогноз работоспособности линии заключается в указании номера  $j$  временного интервала работоспособности линии по множеству контролируемых параметров  $\{x\}$  в процессе нормальной эксплуатации.

**Решение задачи:** задача решена с помощью алгоритмов распознавания образов, основанных на математическом языке R-функций [6], подробно описанных в [7]. Сущность алгоритма заключена в следующем.

На первом этапе (этапе обучения) алгоритму сообщаются данные о траекториях и интервалах работоспособности в соответствии с априорной классификацией "учителя". В начальный момент при обучении машина запоминает по одной точке  $\{\bar{x}_j\}$  каждого из заданных образов  $A_j$  и разделяет их гиперсферами с центрами в данных точках и радиусами, равными половине расстояния от данной до ближайшей точки "чужого" образа в пространстве  $\{x_k\}$ . При этом каждая гиперсфера определяется предикатом

$$A_j = P_j^+(\bar{x}) \equiv \left\{ \left[ \frac{r_j^2}{4} - \left( \sum_{q=1}^n (x_{pq} - x_{sq})^2 \right) \right] \geq 0 \right\}, \quad (1)$$

где  $p$  и  $s$  –  $p$ -ая и  $s$ -ая координаты соответствующих векторов,  $A_j$  – булева переменная, соответствующая  $j$  гиперсфере

$$r_j^2 = \overline{\min}_j \left[ \sum_{q=1}^n (x_{pq} - x_{sq})^2 \right].$$

Доопределение предикатов (1) осуществляется в соответствии со следующей логической процедурой. Если после  $K$ -ого такта обучения

распознаванию  $N$ -образов построены предикаты  $A_{j(k)} \equiv P_{j(k)}^+(\bar{x})$ , а очередная

точка  $\bar{x}_{k+1} \in P_{j(k)}^+(\bar{x})$ , то после  $(k+1)$  такта принимается следующая разделяющая функция

## Автоматизация та управління процесами збагчення

$$P_{j(k)}^+(\bar{x}) = \begin{cases} P_{1k}(\bar{x}) \wedge_1 \overline{P_{j(k+1)}(\bar{x})} \\ P_{2k}(\bar{x}) \wedge_1 P_{j(k+1)}(\bar{x}) \\ \dots\dots\dots \\ P_{jk}(\bar{x}) \vee_1 P_{j(k+1)}(\bar{x}) \\ \dots\dots\dots \\ P_{Nk}(\bar{x}) \wedge_1 \overline{P_{j(k+1)}(\bar{x})} \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом, если заложить в программу УВМ методику аналитического описания областей методом R – функций [6], то УВМ реализует автоматическое

построение разделяющих функций в форме предикатов  $P_j^+(\bar{x})$ , определяющих в конце обучения некоторые поверхности, которые аппроксимируют в пространстве параметров границы областей заданных образов.

На втором этапе (этапе распознавания – прогнозирования) алгоритму сообщаются данные о траектории параметров работоспособности исследуемой линии в виде вектора  $\bar{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ , по которым алгоритм определяет место возможного сбоя и выдает рекомендации по нахождению оптимального режима работы линии для прогнозируемого периода ее работоспособности.

В качестве параметров, характеризующих работоспособность технологической линии, были выбраны:  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  – сигналы с датчиков заполнения и мощности трех шаровых мельниц и насосных агрегатов;  $x_6$  – производительность линии;  $x_7, x_8, x_9$  – процентное содержание железа в промпродуктах;  $x_{10}, x_{11}$  – процентное содержание железа в хвостах и концентрате. Таким образом, работоспособность технологической линии описана 11 – мерным вектором  $\{x_1, x_2, \dots, x_{11}\}$  путем выделения трех состояний  $S_1, S_2, S_3$  по каждому агрегату и шести периодов работоспособности по всей линии путем построения уравнений (1,2) на основе анализа причинно-следственных связей между технологическими агрегатами линии и параметрами  $\{x_1, x_2, \dots, x_{11}\}$ .

После 30 тактов обучения УВМ получена следующая предикатная обучающая последовательность  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_{12}, P_{14}, P_{15}, P_{21}, P_{26}, P_{27}, P_{28}$ . При этом предикаты  $\{P_1, P_4, P_{28}\}$  соответствуют образу  $S_1$ , предикаты  $\{P_2, P_{14}, P_{26}\}$  соответствуют образу  $S_2$ , а предикаты  $\{P_3, P_{12}, P_{15}, P_{21}, P_{27}\}$  соответствуют образу  $S_3$ . Таким образом, в 30 тактах машинного обучения информативными

## Автоматизация та управління процесами збагчення

оказались точки  $\{\bar{x}_1, \bar{x}_4, \bar{x}_{28}\} \in S_1$ ;  $\{\bar{x}_2, \bar{x}_{14}, \bar{x}_{26}\} \in S_2$ ;  
 $\{\bar{x}_3, \bar{x}_{12}, \bar{x}_{15}, \bar{x}_{21}, \bar{x}_{27}\} \in S_3$ , а разделяющая функция имеет вид:

$$P_{S_1} \equiv (\dots(P_1^+ \{\bar{x}_1\} \vee_1 P_4^+ \{\bar{x}_4\}) \wedge_1 P_{12}^+ \{\bar{x}_{12}\}) \wedge_1 P_{14}^+ \{\bar{x}_{14}\}) \wedge_1 P_{15}^+ \{\bar{x}_{15}\}) \wedge_1 P_{21}^+ \{\bar{x}_{21}\}) \vee_1 P_{26}^+ \{\bar{x}_{26}\}) \wedge_1 P_{27}^+ \{\bar{x}_{27}\}) \wedge_1 P_{28}^+ \{\bar{x}_{28}\});$$

$$P_{S_2} \equiv (\dots(P_2^+ \{\bar{x}_2\} \wedge_1 P_4^+ \{\bar{x}_4\}) \wedge_1 P_{12}^+ \{\bar{x}_{12}\} \vee_1 P_{14}^+ \{\bar{x}_{14}\}) \wedge_1 P_{15}^+ \{\bar{x}_{15}\}) \wedge_1 P_{21}^+ \{\bar{x}_{21}\}) \vee_1 P_{26}^+ \{\bar{x}_{26}\}) \wedge_1 P_{27}^+ \{\bar{x}_{27}\}) \wedge_1 P_{28}^+ \{\bar{x}_{28}\});$$

$$P_{S_3} \equiv (\dots(P_3^+ \{\bar{x}_3\} \wedge_1 P_4^+ \{\bar{x}_4\}) \vee_1 P_{12}^+ \{\bar{x}_{12}\}) \wedge_1 P_{14}^+ \{\bar{x}_{14}\}) \vee_1 P_{15}^+ \{\bar{x}_{15}\}) \vee_1 P_{21}^+ \{\bar{x}_{21}\}) \wedge_1 P_{26}^+ \{\bar{x}_{26}\}) \vee_1 P_{27}^+ \{\bar{x}_{27}\}) \wedge_1 P_{28}^+ \{\bar{x}_{28}\}).$$

Остальные точки обучающей последовательности оказались неинформативными.

Эксперименты по автоматическому распознаванию с помощью алгоритма распознавания показали, что при длине обучающей последовательности свыше 38 реализаций достигается приемлемая для практических целей точность распознавания (98,4% правильных ответов и 1,6% ответа "не знаю"). Выдача рекомендации оператору-диспетчеру осуществлена в виде оценок "исправно", "работоспособность линии ниже заданной" "остановка на ремонт", а УВМ, кроме того выдает номер интервала, определяющий срок безотказной работы линии с заданной вероятностью ошибки.

В процессе автоматического распознавания работоспособности технологического оборудования линий переработка руд возникают задачи прогнозирования момента возникновения ситуаций, определяемых как аварийные и связанных, прежде всего, с переполнением шаровых мельниц измельчаемым материалом и забивкой гидроциклонов. Такие аварийные ситуации характеризуются повышенным содержанием некондиционных классов крупности в сливах классифицирующих агрегатов и вызывают пониженное качество функционирования всей технологической линии обогащения. Было проведено имитационное моделирование процесса распознавания аварийных технологических ситуаций с применением вышеописанных алгоритмов.

## Автоматизация та управління процесами збагчення

Момент виникнення аварійної ситуації для шарових мельниць замкнутого циклу характеризується переходом робочої точки на праву частину статическої характеристики в область аварійних режимів [8], характеризуючихся збільшенням приращення циркулюючої нагрузки  $\Delta C$  над величиною приращення  $\Delta(Q+C)$  суммарного живлення мельниці, де  $Q$  – вихідне живлення (виробничість) технологічної лінії. Границя стійкості може бути визначена вираженням

$$\Delta C[\Delta(Q + C)]^{-1} = 1$$

Визначення моменту часу  $t$ , при якому відбувається перехід меж стійкої роботи шарової мельниці, і будемо називати областю виникнення аварійної ситуації. Тоді прогноз її виникнення заключається в розбитті пространства ознак  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , характеризуючих режими роботи шарової мельниці на три області:  $S_1^M$  – область стійкої роботи;  $S_2^M$  – область недогрузу мельниці;  $S_3^M$  – область перегрузу шарової мельниці (потенціально небезпечна ситуація). А розпізнавання областей  $S_1^M, S_2^M, S_3^M$  здійснено по інформації датчиків заповнення (потужності, вібрації), виробничості лінії, витрати води в шарову мельницю аналізатора густоти і гранулометричного складу пульпи слива класифікатора.

Після 12 тактів навчання УВМ формує наступну предикатну послідовність:  $P_1, P_2, P_3, P_5, P_7, P_{10}$ . Це означає, що в 12 тактах навчальної послідовності інформативними виявились точки  $\{x_1, x_5\} \in S_1^M; \{x_2, x_7\} \in S_2^M; \{x_3, x_{10}\} \in S_3^M$ .

Розділяюча функція має вигляд:

$$P_{S_1^M} \equiv (((P_1^+ \{\bar{x}_1\} \wedge_1 P_2^+ \{\bar{x}_2\}) \vee_1 P_5^+ \{\bar{x}_5\}) \wedge_1 P_7^+ \{\bar{x}_7\}) \wedge_1 P_{10}^+ \{\bar{x}_{10}\}$$

$$P_{S_2^M} \equiv ((P_2^+ \{\bar{x}_2\} \wedge_1 P_5^+ \{\bar{x}_5\}) \vee_1 P_7^+ \{\bar{x}_7\}) \wedge_1 P_{10}^+ \{\bar{x}_{10}\}$$

$$P_{S_3^M} \equiv (((P_3^+ \{\bar{x}_3\} \wedge_1 P_2^+ \{\bar{x}_2\}) \wedge_1 P_5^+ \{\bar{x}_5\}) \wedge_1 P_7^+ \{\bar{x}_7\}) \vee_1 P_{10}^+ \{\bar{x}_{10}\}$$

## Автоматизация та управління процесами збагачення

Остальные шесть точек обучающей последовательности оказались неинформативными. После окончания режима обучения на вход УВМ подано 30 точек, соответствующих образам  $S_1^M$ ,  $S_2^M$ ,  $S_3^M$ , с целью проверки распознающей программы. В результате этого получено 97% правильных ответов, 2% ошибочных ответов и 1% "не знаю". УВМ выдает оператору-диспетчеру рекомендации в виде оценок "недогруз", "норма" "авария". При получении информации о перегрузке шаровой мельницы "авария" оператор отключает нагрузку на время  $t_b$ , требуемое для выхода процесса на линейную часть статической характеристики. Время отключения питателя  $t_b$  и новое значение расхода руды в мельницу определяется с учетом динамических характеристик замкнутого цикла измельчения.

Момент нарушения работы гидроциклона (забивку пескового отверстия) можно определить по информации датчиков:  $x_1$  – мощности привода пескового насоса;  $x_2$  – давления пульпы в нагнетающем патрубке;  $x_3$ ,  $x_4$  – анализатора плотности и гранулометрического состава пульпы в сливе гидроциклона. При этом наблюдается скачок в увеличении мощности привода пескового насоса и плотности слива  $\rho_2$ , а также снижение выхода готового класса – 0,070мм  $x_4$  в сливе гидроциклона.

Область устойчивого режима работы гидроциклона за период стационарности процесса характеризуется постоянством содержания класса – 0,070мм в его сливе. Область неустойчивого режима работы гидроциклона характеризуется уменьшением содержания класса – 0,070мм на 15–25% от заданного. Прогнозирование оператору характера работы классифицирующего оборудования осуществлено УВМ в виде оценок "норма", "забивка". При получении информации о "забивке" пескового отверстия гидроциклона оператор переключает технологическую линию на резервный гидроциклон, а для гидроциклонов Ø710 мм выдает команду на реверсирование импульсного бегущего электромагнитного поля электромагнитной песковой насадки [9].

Разработанные встроенные системы диагностики и контроля работоспособности энергоемкого технологического оборудования (технологических линий) обогатительной фабрики внедрены в проекты реконструкции предприятий ГМК в виде технологических экспертных систем и выступают как инструмент помощи оперативно-технологическому персоналу фабрики. Разработанные экспертные системы значительно улучшают управление сложным технологическим процессом благодаря рекомендации операционному персоналу в условиях нарушения работы некоторой части оборудования и обеспечивают рекомендации по ремонту технологического и энергомеханического оборудования технологической линии.

Принципы распознавания работоспособности технологической линии

## Автоматизация та управління процесами збагачення

обогащения и режимов работы ее отдельных агрегатов, основанные на учете изменяющихся динамических свойств технологических агрегатов, и описанные алгоритмы распознавания образов заложены в структуру автоматического распознавания аварийных ситуаций [3]. Основу экспертной системы составляют: интеллектуальное устройство выявления аварийных ситуаций, устройство оценки качества функционирования сложных технических объектов, блоки экспертной оценки, базы знаний и распознавания, позволяющие с высокой степенью достоверности оценить периоды работоспособности технологического оборудования, спрогнозировать персоналу аварийные и аномальные ситуации и состояния, принимать оперативные решения по управлению технологическим процессом обогащения с учетом технического состояния электромеханического оборудования технологических линий обогатительной фабрики.

В процессе работы экспертной системы оператор получает информацию о принадлежности состояния контролируемого объекта к одному из подмножеств множества состояний в виде оценок: "исправное состояние" (нормальная ситуация), "работоспособное состояние" (аномальная ситуация), "неработоспособное состояние – авария" (аварийная ситуация), а также величины отклонений контролируемого параметра и скорости его изменения, являющейся характеристикой динамического состояния объекта контроля, от заданного значения.

**Выводы.** Рекомендуемая для внедрения на горно-обогатительных комбинатах специализированная экспертная система (ЭС) интеллектуального управления представляет собой подсистему АСУТП обогатительной фабрики. Она позволяет оператору с использованием разработанных алгоритмов интеллектуального управления [10] результативно управлять технологическими линиями, путем формирования закона управления и проведения идентификации в темпе протекания технологического процесса производства концентрата, распознавать аварийные режимы работы и выдавать оперативному персоналу рекомендации по их устранению

Разработанные методы и средства ситуационной диагностики внедрены на одной из обогатительных фабрик, а алгоритмы распознавания используются при проектировании и освоении типового математического и технического обеспечения АСУ ТП предприятий цветной и черной металлургии.

### Список литературы:

- 1.Хорольский В.П. Диагностическая система управления технологической линией обогатительной фабрики // Изв. вузов. Горный журнал. – 1992. – №11. – С.71–76.
- 2.Хорольский В.П., Бабец Е.К. Автоматический анализ работоспособности технологических линий обогащения // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 1982. – №6. – С.103–107.



## Автоматизация та управління процесами збагачення

3. А.С. 963029 СССР, М. Кл<sup>3</sup>.G.08B.21/00. Устройство для выявления аварийных ситуаций / Е.К. Бабец, В.П. Хорольский, С.В. Бабец (СССР) – 3248731/18–24; заявлено 12.02.81% опубл. 30.09.82. Бюл. №36.

4. **Згуровский М.З.** Интегрированные системы оптимального управления и проектирования: Учеб. пособие. – К.: Выща шк., 1990. – 351с.

5. **Барский Л.А., Козин В.З.** Системный анализ в обогащении полезных ископаемых. М.: Недра, 1978. – 486с.

6. **Рвачев В.Л.** Геометрические приложения алгебры логики. К.: Техника, 1967. – 211с.

7. **Момот В.Е., Сироджа И.Б., Хорольский В.П.** Комбинированная статистическая модель технологического цикла обогатительной фабрики // Изв. вузов. Горный журнал. – 1977. – №7. – С.121–126.

8. **Арефьев Б.А.** Оптимизация инерционных процессов. – Л.: Машиностроение, 1969. – 160с.

9. **Тисменецкий Л.Р., Хорольский В.П.** Исследование и разработка критерия оценки качества работы гидроциклонов в условиях рудообогатительных фабрик // Исследование и промышленное применение гидроциклонов. Тез. докл. Первого симпозиума. Горький: 1981. – С.18–21.

10. **Хорольский В.П., Бабец Е.К.** Искусственный интеллект в системах управления сложными технологическими процессами // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук. техн. зб. – 2003. – №70. – С.44–51.

© Хорольский В.П., Хоцкина В.Б., Бабец Е.К., 2005

*Надійшла до редколегії 18.12.2004 р.*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*

УДК 622.179.14

**О.В. ГРАЧЕВ,**

**В.Ф. ПОЖИДАЕВ, В.А. УЛЬШИН,** доктора техн. наук

(Украина, Луганск, Украинский восточноукраинский университет)

### **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОДГОТОВКИ УГОЛЬНОЙ ШИХТЫ С ЦЕЛЬЮ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ПО ПРОИЗВОЛЬНОМУ КРИТЕРИЮ**

На фоне общего снижения качества добываемого угля его характеристики резко отличаются не только от шахты к шахте, но и от пласта к пласту. Неоднородность поступающего на обогащение сырья требует качественных систем управления процессом подготовки шихты. Использование шихты в углеобогащении на данный момент не нашло должного распространения, так как существующие методы не могут быть применены к условиям постоянно меняющегося сырья и так называемой работе "с колес", а также при переменном фракционном и гранулометрическом составе. Поэтому актуальна проблема

111

**Збагачення корисних копалин, 2005. – Вип. 22(63)**