

теории автоматического управления. Посредством применения правила «победитель получает больше» усовершенствован стандартный алгоритм самообучения спайк-нейронной сети.

**Ключевые слова:** аналогово-цифровая архитектура, самообучающаяся фаззи-спайк-нейронная сеть, теория автоматического управления, алгоритм обучения без учителя, правило «победитель получает больше».

УДК 681.51: 622.7

Купін А. І.

*Канд. техн. наук, завідувач кафедри Криворізького технічного університету*

## СТРУКТУРА ПРОТОТИПУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗБАГАЧЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ

Наведено структурну схему прототипу інтелектуальної системи керування секцією магнітного збагачення залізної руди. На основі результатів промислових випробувань зроблена оцінка економічної ефективності впровадження подібної системи в умовах збагачувального виробництва.

**Ключові слова:** інтелектуальна система керування, збагачення, залізна руда, ефективність.

### ВСТУП

У наш час достатньо актуальною проблемою для вітчизняних підприємств гірничо-металургійної галузі промисловості є підвищення конкурентоспроможності виробництва за рахунок зменшення собівартості переділу, оптимізації енерговитрат, стабілізації або поліпшення якості продукції тощо. Загальновідомо, що одним з найбільш перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є комплексна автоматизація технологічних процесів (ТП) [1, 2].

Технологічні процеси збагачення руд чорних металів (магнетитових кварцитів) є достатньо складними об'єктами автоматизації. Це обумовлено їх багатомірністю та багатостадійністю, властивостями нелінійності та нестационарності, значним запізненням інформаційних показників у часі, наявністю нечіткої та неповної інформації. У зв'язку з цим можливості застосування класичних підходів теорії автоматизованого керування є доволі обмеженими [3].

Теоретичні дослідження, комп'ютерне моделювання та промислові випробування [3–9] довели потенціальні можливості застосування інтелектуальних підходів щодо ідентифікації, керування та оптимізації ТП збагачення магнетитових кварцитів. У першу чергу це стосується сучасних напрямів розвитку штучного інтелекту: нейрокерування, нечіткої логіки, класифікаційного керування та еволюційної оптимізації.

Враховуючи, що поточний стан дослідження можливостей застосування подібних технологій у гірни-

чій справі поки містить доволі обмежену кількість реальних впроваджень на вітчизняних підприємствах, постійно виникають питання щодо техніко-економічного обґрунтування таких розробок. Тому метою статті є оцінка ефективності впровадження інтелектуальної системи керування в умовах технологічної лінії (секції) рудозбагачувальної фабрики (РЗФ) гірничо-збагачувального комбінату (ГЗК).

### ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Згідно з рішеннями, розглянутими у попередніх роботах автора [3, 5–8], розглядається така схема реалізації ІСК (рис. 1).

Основою системи є апаратно-програмне ядро ІСК (блок № 1), що складається з п'яти підсистем.

1.1. Інтерфейсна частина, сервер та монітор SCADA. Реалізується на підставі спеціалізованого програмного забезпечення типу: Контур, Monitor Pro, Scantic, Trace Mode [10–14]. Ця підсистема виконує функції візуалізації (моніторингу) ходу ТП, введення та контролювання уставок технологічних параметрів, формування звітів. На апаратному рівні такі підсистеми реалізуються на підставі застосування архітектури «клієнт – сервер». В якості серверів робочих станцій застосовується переважно комп'ютерне обладнання у промисловому виконанні з підвищеним рівнем надійності (стандарти IP50, IP65-67 [13]). Клієнтські станції реалізуються у вигляді автоматизованих робочих місць (АРМ) спеціалістів (наприклад, технолога, диспетчера РЗФ). Для інфор-

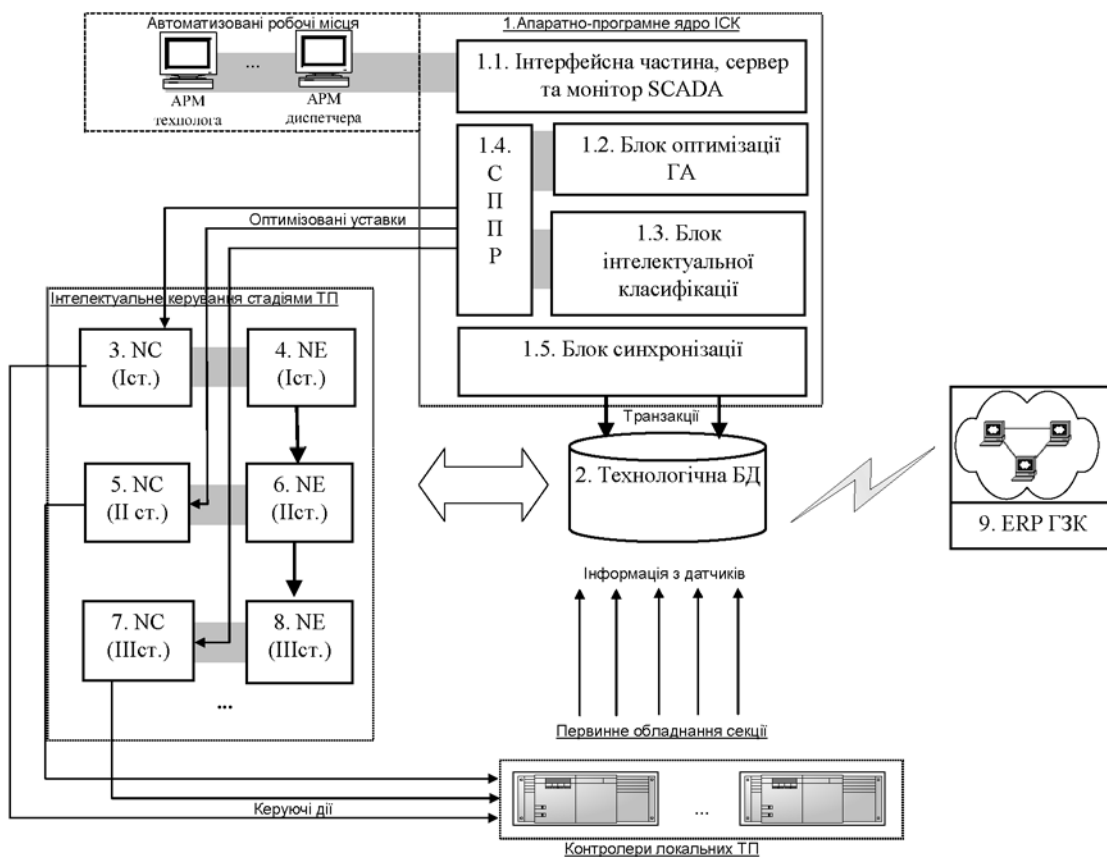


Рис. 1. Загальна структурна схема реалізації прототипу ІСК секцією збагачення

маційного обміну необхідно застосовувати промислові протоколи типу ModBus, ProfBus, CAN [14].

1.2. Блок оптимізації з застосуванням генетичних алгоритмів (ГА) призначений для визначення уставок для показників стадій та локальних ТП збагачення з застосуванням еволюційних методів та генетичних алгоритмів. Реалізується програмно на підставі застосування відповідних алгоритмів або у вигляді окремого модуля (бібліотеки) поширених спеціалізованих пакетів типу MATLAB, GeneHunter, FlexTool, Evolver, Auto2Fit [2].

1.3. Блок інтелектуальної класифікації має схожі функції з попереднім блоком, але працює на підставі застосування підходів класифікаційного керування. Реалізується програмно з використанням процедур нейромережевої кластеризації та класифікації. Можливо також застосування інших спеціалізованих програмних пакетів аналогічного призначення [15].

1.4. Система підтримки прийняття рішень (СППР) фактично поєднує два попередні блоки оптимізації та класифікації. Блок реалізується програмно на підставі застосування алгоритму, наведеного в [3].

1.5. Блок синхронізації призначений для забезпечення безперервного опитування датчиків усіх ло-

кальних ТП з непохідною дискретністю, поповнення технологічної бази даних (БД) актуальними значеннями показників згідно з переліком [4], забезпечення постійної взаємодії та інформаційного обміну з іншими підсистемами ІСК (нейроемюляторами та контролерами). Реалізується програмно засобами SCADA.

2. Технологічна база даних (БД) призначена для накопичення статистики зміни показників у ході роботи ТП. Як системи керування такою БД доцільно застосовувати СУБД промислового типу: Industrial SQL, ORACLE, MS SQL, Informix [12–14].

3–8. Блоки, що реалізують автоматизоване інтелектуальне керування окремими стадіями ТП збагачення в умовах секції як технологічної лінії РЗФ. Згідно зі структурною схемою (рис. 1) такі підсистеми реалізуються із застосуванням нейромережевих контролерів (NC) та емуляторів (NE). Причому, згідно з [3] кожна окрема стадія має окремий контролер та емулятор. Згідно з принципами роботи ІСК, нейроконтролери призначені для забезпечення підтримки необхідних уставок, значення яких розраховуються у СППР (блок 1.4). У свою чергу нейроемюлятори (предиктори) забезпечують здійснення

процедур прямого та зворотного (інверсного) прогнозування на підставі поточних значень показників з технологічної БД. Таким чином забезпечується робота ІСК як на рівні окремих стадій, так і на рівні окремих локальних ТП.

9. Шлюз до корпоративної інформаційної системи підприємства (ERP ГЗК). Блок забезпечує можливість обміну інформацією між ІСК та апаратно-програмними системами більш високого рівня (ERP, MES, АСУП тощо). Принципи, технології та апаратне забезпечення для реалізації таких структур достатньо добре відомі [1–3, 10–14 та ін.].

Існують два основних способи реалізації штучних нейронних (нейромережевих) структур: програмний та апаратний. Кожен із зазначених способів має чітко визначені переваги та недоліки, які обов'язково необхідно враховувати при проектуванні та практичній реалізації нейромережевих систем та пристроїв [5]. У роботі [3] для структурної схеми рис. 1 запропоновано прототипи реалізації ІСК ТП збагачення як першим, так і другим способом. При цьому було встановлено, що програмна реалізація нейромережевих блоків ІСК із застосуванням нейроемулатору типу Neuro Solution показала більшу гнучкість при синтезі та при переналаштуванні. Разом з цим продуктивність роботи ІСК і, особливо, параметризації (навчання) була на 40–60 % нижчою, ніж при застосуванні апаратної реалізації.

Апаратна реалізація ІСК засобами нейропроцесорів типу NeuroMatrix NM6403/6404 [3, 16] продемонструвала більш високу продуктивність параметризації, обчислень та спостереження (підтримання) уставок. Однак, така технологія є більш складною та

трудомісткою в процесі відтворення, а також дозволяє реалізувати обмежений набір нейромережевих структур та алгоритмів навчання.

Промислові випробування програмного прототипу ІСК проводилися в умовах секції № 6 РЗФ-2 Новокриворізького ГЗК (ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг») та секції № 2 РЗФ-2 Південного ГЗК (м. Кривий Ріг). Результати зазначених випробувань довели, що застосування подібної системи дозволяє стабілізувати низку важливих результуючих показників якості, виходу та вилучення корисного компоненту в концентраті. Зазначений факт було обрано за основу для обґрунтування доцільності подальшої технічної реалізації проекту.

Отже, у роботі ставиться завдання оцінки ефективності впровадження подібної ІСК в умовах діючої секції збагачувальної фабрики.

### МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ

Обґрунтування застосування системи інтелектуального керування в умовах технологічної лінії (секції) РЗФ можливо здійснити на підставі урахування низки стабілізуючих факторів (зниження амплітуди коливань математичного сподівання та дисперсії якісних та кількісних показників ТП). Для цього використовувалися залежності собівартості переділу в умовах різних ГЗК Кривбасу (рис. 2), отримані в роботі [17].

Аналіз залежностей рис. 2 свідчить, що збільшення виходу концентрату на 1 % приводить до зменшення питомих витрат на переділ збагачення у середньому на 2–4 грн./т. Наведені дані достатньо

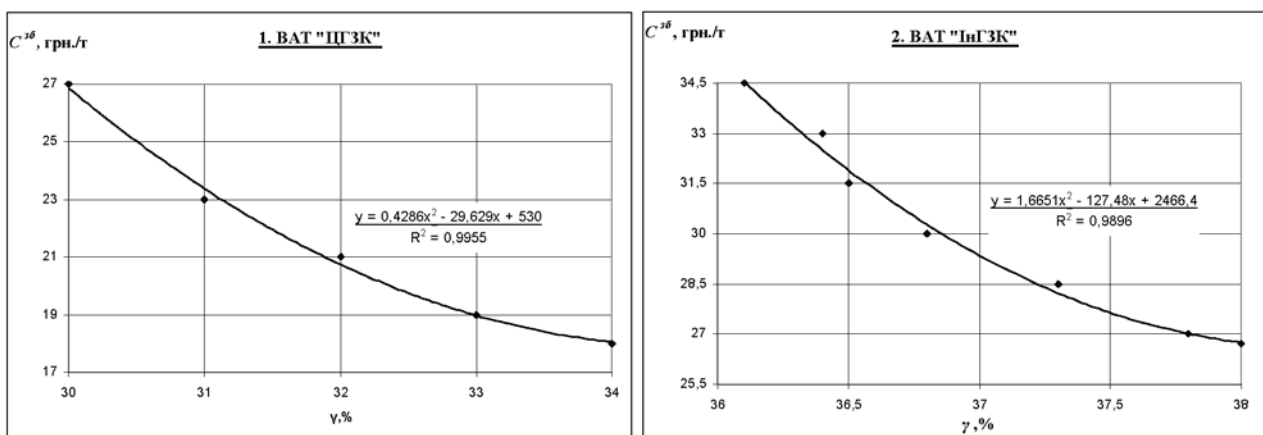


Рис. 2. Тренд залежності питомих витрат з переробки та збагачення ( $C^{36}$ , грн./т) від виходу концентрату ( $\gamma$ , %):

1 – Центральний ГЗК; 2 – Інгулецький ГЗК

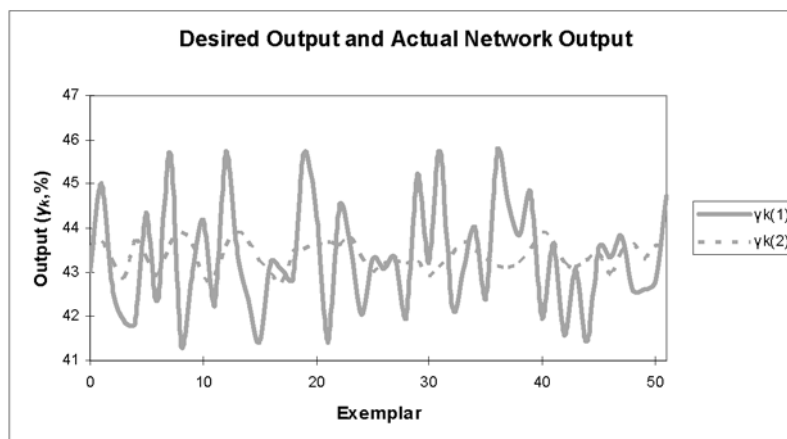


Рис. 3. Зміни показника виходу концентрату (ЦГЗК):

1 – без застосування ІСК; 2 – при застосуванні ІСК

добре апроксимуються поліноміальним трендом другого порядку (коефіцієнт детермінації  $R^2$  перевищує 0,99). З іншого боку, результати моделювання та промислових випробовувань роботи ІСК при відстеженні показників виходу концентрату дозволяють стверджувати про достатню результативність застосування запропонованого підходу (рис. 3).

Розрахунки, виконані на підставі досліджень за даними РЗФ Центрального ГЗК, показують зменшення дисперсії виходу результуючого концентрату приблизно на 1,5 % (за рахунок стабілізуючих властивостей системи інтелектуального керування в умовах локальних ТП збагачення). При цьому математичне сподівання збільшилося на 0,3 %. Останнє дозволяє стверджувати про потенційне збільшення виходу результуючого концентрату у середньому на 0,3 %.

Отже, з урахуванням трендових залежностей (рис. 2) та рекомендацій методики [1] оцінка річного економічного ефекту за рахунок збільшення виходу результуючого концентрату на прикладі РЗФ Центрального ГЗК буде складати

$$E_p = \Delta\gamma \cdot \Delta C^{36} \cdot Q_p + \Delta\gamma \cdot C^k \cdot Q_p = \Delta\gamma \cdot Q_p (\Delta C^{36} + C^k), \quad (1)$$

де  $E_p$  – оцінка значення загального річного економічного ефекту, що очікується, грн.;  $\Delta\gamma$  – приріст значення виходу результуючого концентрату за рахунок стабілізації технологічних показників, % (на підставі вищезазначених міркувань приймаємо  $\Delta\gamma = 0,3\%$ );  $\Delta C^{36}$  – зменшення питомої собівартості переділу збагачення за рахунок збільшення виходу концентрату на 1 %, грн./т (для розрахунку приймаємо  $\Delta C^{36} = 2$  грн./т);  $C^k$  – ринкова ціна 1 т концентрату вста-

новленої якості, вологості, домішок тощо, грн./т (від 70 \$/т в цінах першого півріччя 2008 р.);  $Q_p$  – усереднена річна продуктивність типової секції РЗФ з переробки руди, т/рік (з урахуванням проектної місячної продуктивності, ремонтних та інших вимушених простоїв, для цього приймаємо  $Q_p = 1,2$  млн. т/рік).

При цьому перша складова формули (1) враховує зменшення собівартості переділу збагачення, а друга – збільшення доходу за рахунок реалізації додаткового концентрату. З урахуванням цього розрахунок інтегрованого значення річного економічного ефекту для однієї типової секції РЗФ в умовах Центрального ГЗК дає

$$E_p = 0,003 \times 1200000 (2 + 340) = 1\,231\,200 \text{ грн.} \approx 1,23 \text{ млн. грн.}$$

Для розрахунку решти показників економічної ефективності та терміну окупності при створенні ІСК застосуємо відомі методики [3].

Коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень ( $e_{кв}$ ) на впровадження ІСК розраховується за формулою

$$e_{кв} = E_p / (K_B + E_B), \quad (2)$$

де  $K_B$  – капітальні витрати на створення ІСК;  $E_B$  – експлуатаційні витрати на впровадження, експлуатацію та обслуговування системи.

Гранична величина капітальних витрат на створення ІСК, призначеної для одночасного контролю однієї технологічної лінії (секції) РЗФ, згідно з [1] становить 600 тис. грн.

Експлуатаційні витрати на рік (12 місяців) з розрахунку 1,5 % на місяць складуть

$$E_B = 0,015 K_B \times 12 = 108 \text{ тис. грн.}$$

Тоді на підставі залежності (2) коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень дорівнює

$$e_{\text{кв}} = 1\,231\,200 / (600\,000 + 108\,000) = 1,74.$$

Термін повної окупності системи

$$T = 1/e_{\text{кв}} = 1/1,74 \approx 0,6 \text{ р.} = 7,2 \text{ міс.} \quad (3)$$

Схожі результати дають аналогічні розрахунки для РЗФ інших ГЗК Кривбасу.

## ВИСНОВКИ

1. Розрахунок економічної ефективності впровадження ІСК в умовах секції РЗФ з річним обсягом продуктивності переробки за рудою 1,2 млн. т при збільшенні виходу (за рахунок стабілізації) сумарного концентрату на 0,3 %, капітальних витратах 600 тис. грн., додаткових експлуатаційних витратах 100 тис. грн. показує, що інтегральний річний економічний ефект складає 1,23 млн. грн., строк окупності проекту 0,6 року.

2. Результати промислових випробувань ІСК секцією збагачення та розрахунки потенційного економічного ефекту свідчать про доцільність впровадження подібних рішень в умовах технологічних ліній вітчизняних ГЗК.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Назаренко В. М. Управління роботою гірничозбагачувального комбінату при використанні інформаційних технологій 21-го сторіччя / В. М. Назаренко, М. В. Назаренко, С. А. Хоменко, А. І. Купін // Академический вестник Криворожского территориального отделения Международной Академии компьютерных наук и систем. – 2001. – № 7–8. – С. 43–49.
2. Назаренко В. М. Сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку інтегрованих систем управління на підприємствах ГМК / В. М. Назаренко, А. І. Купін // Академический вестник Международной Академии компьютерных наук и систем. – 2007. – № 20. – С. 61–66.
3. Купін А. І. Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології : монографія. – Кривий Ріг : КТУ, 2008. – 204 с.
4. Купін А. І. Обґрунтування використання технологій штучного інтелекту для управління технологічним процесом збагачення магнетитових кварцитів / А. І. Купін // Вісник КТУ. – 2003. – Вип. 1. – С. 51–55.
5. Гвоздик В. С. Реализация согласованного управления мельницами измельчения на основе применения нечеткого контролера / В. С. Гвоздик, А. И. Купин // Разраб. рудн. месторожден. – 2005. – Вып. 88. – С. 148–152.
6. Купін А. И. Исследование авторегрессионных моделей нейросетевой идентификации для процессов обогащительной технологии / А. И. Купин, В. М. Назаренко // Матеріали XIV міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика–2007). – Ч. 2. – Севастополь : СМУЯС-ІП, 2007. – С. 147–149.
7. Купін А. И. Исследование инверсных моделей нейроконтроллера для систем интеллектуального управления

ТП горнорудных предприятий / А. И. Купин, С. А. Рубан // Вісник КТУ. – 2007. – № 18. – С. 157–161.

8. Назаренко В. М. Інтелектуальне управління технологічним процесом збагачення магнетитових кварцитів / В. М. Назаренко, А. І. Купін // Матеріали XXIII Міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика–2006). – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2006. – С. 406–409.
9. Kupin A. Neural identification of technological process of iron ore beneficiation / A. Kupin // Proceedings of 4th IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems Technology and Applications (IDAACS'2007). – 2007. – P. 225–227.
10. Мишель Ж. Программируемые контроллеры: архитектура и применение / Мишель Ж. – М. : Машиностроение, 1992. – 320 с.
11. Петров И. В. Программируемые контроллеры. Практическое применение языков стандарта МЭК 61131-3 / И. В. Петров ; под ред. проф. В. П. Дьяконова. – М. : Солон-Пресс, 2004. – 254 с.
12. Андреев Е. Б. SCADA-системы: взгляд изнутри / Е. Б. Андреев, Н. А. Куцевич, О. В. Синенко. – М. : РТСОфт, 2004. – 176 с.
13. Анашкин А. С. Техническое и программное обеспечение распределенных систем управления / А. С. Анашкин, Э. Д. Кадыров, В. Г. Хазаров ; под ред. проф. В. Г. Хазарова – СПб. : П-2, 2004. – 368 с.
14. Ослендер Д. Управляющие программы для механических систем: объектно-ориентированное проектирование систем реального времени / Д. Ослендер, Дж. Риджи, Дж. Ринггенберг. – М. : БИНОМ Лаборатория базовых знаний, 2004. – 413 с.
15. Краснопопосовский А. С. Информационный синтез интеллектуальных систем управления / Краснопопосовский А. С. – Сумы : СумДУ, 2004. – 261 с.
16. Костров Б. В. Микропроцессорные системы и микроконтроллеры / Б. В. Костров, В. Н. Ручкин. – М. : «ТехБук», 2007. – 320 с.
17. Варава Л. М. Методичні підходи до розробки підвищення конкурентоспроможності сировинної продукції / Л. М. Варава // Вісник КТУ. – № 21. – 2008. – С. 237–241.

Надійшла 16.04.2009

Купин А. И.

### СТРУКТУРА ПРОТОТИПА И ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ

Приведена структурная схема прототипа интеллектуальной системы управления секцией магнитного обогащения железной руды. На основе результатов промышленных испытаний сделана оценка экономической эффективности внедрения подобной системы в условиях обогатительного производства.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система управления, обогащение, железная руда, эффективность.

Kupin A. I.

### FEASIBILITY REPORT ON INTRODUCTION OF THE INTELLECTUAL CONTROL SYSTEM FOR IRON ORE BENEFICATION PROCESS

The block diagram of the prototype of an iron ore magnetic separation intellectual control system is presented. On the basis of industrial tests results cost-effectiveness of this system introduction at the concentration plant has been estimated.

**Key words:** intellectual control system, concentration, iron ore, efficiency.