

УДК 622.7.092

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД

Осипова Н.В., к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация» (nvo86@mail.ru)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. В работе изложено современное состояние проблем автоматизации и контроля показателей мокрого магнитного обогащения на железорудных горно-обогатительных комбинатах. Приведены данные по погрешности измерений современных анализаторов вещественного состава пульпы. Показана возможность применения фильтра Калмана в целях получения наиболее точной информации о содержании ценного компонента в концентрате и хвостах продуктов магнитного сепаратора. Дано математическое описание динамики показателей обогащения в координатах состояния в виде системы дифференциальных уравнений. Выбраны предельно допустимые и номинальные значения расхода воды в ванну сепаратора и частоты вращения его барабана, а также соответствующие им данные по массовой доле магнетитового железа в концентрате и хвостах на основании справочной информации. С помощью программы компьютерного моделирования MATLAB составлены нелинейные статические характеристики, отражающие зависимость технологических показателей магнитного обогащения от управляющих воздействий. Проведена линеаризация динамической модели системы с использованием разложения в ряд Тэйлора в окрестности точек, отвечающих номинальному режиму работы. Рассчитаны передаточные функции регулирующего клапана расхода воды асинхронного двигателя, вращающего барабан. Определены среднеквадратические отклонения управляющих параметров, влияющих на процесс сепарации. Получены расчетные соотношения для определения ковариационных матриц шума системы, описывающей динамику показателей магнитного обогащения, и шума их измерений приборами, контролирующими содержание магнетитового железа в концентрате и хвостах. Представлен алгоритм оценивания координат состояния фильтром Калмана, состоящий из двух этапов: предсказания состояния системы и корректировки вектора состояния. Приведены результаты моделирования с использованием среды программирования MATLAB в виде временных диаграмм, отражающих динамику технологических показателей обогащения, их оценку фильтром Калмана и ошибки измерения. Работа системы была рассмотрена при случайных изменениях управляющих воздействий. Подведены итоги, где сообщается о необходимости использования фильтра Калмана в задачах автоматизации и контроля процесса обогащения железных руд.

Ключевые слова: фильтр Калмана, ковариационная матрица, нормальное распределение, правило трех сигм, белый шум, дисперсия, среднеквадратическое отклонение, магнитная сепарация, концентрат, хвосты.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-5-372-377

В последние годы происходит совершенствование технологии обогащения полезных ископаемых, которое связано, в первую очередь, с внедрением современного горного оборудования, созданием новых технологических схем, освоением различных месторождений. Одновременно с этим повышаются требования к извлечению полезного компонента. Поэтому автоматизация и контроль процесса обогащения направлены на получение оперативной информации о составе и свойствах перерабатываемого минерального сырья и продукции, отгружаемой потребителю.

Современные приборы, анализирующие содержание того или иного компонента в горной породе или потоке пульпы, обладают высокой погрешностью, которая может меняться в силу непостоянства их физико-механических свойств. Так, например, точность анализатора рудоносности железорудной пульпы DF-5735 составляет 0,5 % [1], нестабильность показаний датчика АРП-1Ц для контроля содержания химических элементов в хвостах и концентрате – 2 % [2].

При обработке большого массива данных с измерительных приборов, в частности, их фильтрации и сгла-

живания, наибольшую популярность получил фильтр Калмана. Он позволяет по серии неточных измерений выделять полезный сигнал, оценивать ненаблюдаемые координаты и прогнозировать будущее состояние системы [3 – 6]. Благодаря этому повышается точность и надежность регулирования, обеспечивается эффективность работы автоматических систем.

В настоящей работе объектом управления служит сепаратор для мокрого магнитного обогащения железных руд, который применяется на обогатительных фабриках для отделения магнитных частиц от пустой породы во входном потоке пульпы v [7 – 13]. Контролируемыми параметрами при автоматизации процесса магнитной сепарации являются массовая доля содержания железа магнетитового в концентрате β и хвостах [10].

Приведем математическую модель, отражающую динамику технологических показателей обогащения β и v при изменении управляющих воздействий, в качестве которых выберем расход воды в ванну сепаратора W и частоту вращения его барабана ω [10]. В общем виде она описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} T_1 \dot{\beta} + \beta &= f_1(\omega, W) + w_1; \\ T_2 \dot{v} + v &= f_2(\omega, W) + w_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где w_1 и w_2 – шум системы, %; T_1 и T_2 – постоянные времени, с.

Предельно допустимые и номинальные значения параметров β , v , ω , W на обогатительных фабриках приведены в справочнике [7].

Для моделирования выберем следующие значения:

$-\omega_{\min} = 15 \text{ мин}^{-1}$, $\omega_{\text{ном}} = 20 \text{ мин}^{-1}$, $\omega_{\max} = 25 \text{ мин}^{-1}$ – минимальная, номинальная и максимальная частота вращения барабана сепаратора;

$-\beta_{\omega W_{\min}} = 61,2 \%$, $\beta_{\omega W_{\text{ном}}} = 64 \%$, $\beta_{\omega W_{\max}} = 65,6 \%$ – значения содержания железа магнетитового в концентрате, соответствующие вышеприведенным данным;

$-v_{\omega W_{\min}} = 0,93 \%$, $v_{\omega W_{\text{ном}}} = 1,05 \%$, $v_{\omega W_{\max}} = 3,47 \%$ – то же для хвостов.

Пусть оптимальное содержание твердого в питании сепаратора составляет 20 % [9], а номинальный расход пульпы по твердой фазе $Q_{\text{ном}}$ равен 110 т/ч. Если плотность воды $\rho = 1 \text{ т/м}^3$, то номинальный расход воды в сепаратор $W_{\text{ном}} = (110 \text{ т/ч}/1 \text{ т/м}^3) \cdot (100 \%/20 \%) = 550 \text{ м}^3/\text{ч}$. Допустим, что отклонение содержания твердого в питании данного агрегата $\pm 10 \%$. Исходя из этого, минимальный расход воды будет равен $W_{\min} = (110 \text{ т/ч}/1 \text{ т/м}^3) \times (100 \%/30 \%) \approx 367 \text{ м}^3/\text{ч}$, а максимальный $W_{\max} = (110 \text{ т/ч}/1 \text{ т/м}^3) \cdot (100 \%/10 \%) = 1100 \text{ м}^3/\text{ч}$.

С помощью программы моделирования MATLAB, согласно рекомендациям [14, 15], восстановим уравнения $\beta = f_1(\omega, W)$ и $v = f_2(\omega, W)$ по выбранным точкам:

$$\begin{aligned} \beta &= -0,000004W^2 + 0,008W - 0,025\omega^2 + 1,25\omega + 46; \\ v &= -0,000003W^2 + 0,008W + 0,03\omega^2 - 1,25\omega + 10,8. \end{aligned} \quad (2)$$

Выполним линеаризацию системы (2), используя разложение в ряд Тэйлора в окрестности точки $(\omega_{\text{ном}}, W_{\text{ном}})$ [16]:

$$\begin{aligned} \beta &= 0,0048W + 0,25\omega + 56,64; \\ v &= 0,0056W - 0,05\omega - 0,72. \end{aligned} \quad (3)$$

Расход воды в сепаратор регулируется клапаном, который описывается передаточной функцией по каналу степень открытия u_1 – расход воды W [17]:

$$W_{\text{кл}}(p) = \frac{W(p)}{u_1(p)} = \frac{k_{\text{кл}}}{T_{\text{кл}}p + 1}. \quad (4)$$

Коэффициент передачи $k_{\text{кл}}$ находят как отношение максимального расхода воды к степени открытия, равной 100 % [18]:

$$k_{\text{кл}} = \frac{W_{\max}}{100 \%} = \frac{1100 \text{ м}^3/\text{ч}}{100 \%} = 11 (\text{м}^3/\text{ч})/\%. \quad (5)$$

Магнитный сепаратор имеет асинхронный двигатель. Если он регулируемый, то замкнутая система

управления таким механизмом по каналу задание по скорости вращения вала u_2 – частота вращения барабана сепаратора ω может быть аппроксимирована передаточной функцией с $k_{\text{дв}} \approx 1$ и малой постоянной времени $T_{\text{дв}} \ll 1$ [19]:

$$W_{\text{дв}}(p) = \frac{\omega(p)}{u_2(p)} = \frac{k_{\text{дв}}}{T_{\text{дв}}p + 1}. \quad (6)$$

Постоянные времени магнитного сепаратора примем равными $T_1 = T_2 = 1 \text{ с}$ [11], $T_{\text{кл}}$ на порядок меньше T_1 и T_2 [17]. Пренебрежем параметрами $T_{\text{кл}}$ и $T_{\text{дв}}$, тогда

$$W = 11u_1, \quad \omega = u_2. \quad (7)$$

Подставим выражения для W и ω из (7) в систему (3), выполним замену переменных $x_1 = \beta - 56,64$, $x_2 = v - 0,72$. Учитывая линеаризацию функций $f_1(\omega, W)$ и $f_2(\omega, W)$ и то, что $T_1 = T_2 = 1 \text{ с}$, получим новые выражения для динамической модели (1):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_1 + 0,053u_1 + 0,25u_2 + w_1; \\ \dot{x}_2 &= -x_2 + 0,062u_1 + 0,05u_2 + w_2, \end{aligned} \quad (8)$$

или в матричной форме:

$$\dot{x} = Ax + Bu + w, \quad (9)$$

где:

$$\begin{aligned} A &= \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 0,053 & 0,25 \\ 0,062 & 0,05 \end{pmatrix}; \quad x = (x_1, x_2)^T; \\ u &= (u_1, u_2)^T; \quad w = (w_1, w_2)^T. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь A – матрица состояния системы; B – матрица управления.

Представление модели (9) в дискретной форме выглядит следующим образом [20]:

$$x(k+1) = Fx(k) + Nu(k) + w(k); \quad (11)$$

$$F = E + Ah; \quad N = Bh, \quad (12)$$

где $x(k)$, $u(k)$, $w(k)$ – значения координат состояния, управления и шума в текущий момент времени k ; $x(k+1)$ – состояние системы, определяемое на шаг вперед; E – единичная матрица размером 2×2 ; h – период квантования, с; $k = 0, 1, 2, \dots, n$.

В качестве вектора выхода выберем содержание железа в концентрате y_1 и хвостах y_2 :

$$y(k) = Hx(k) + \vartheta(k); \quad (13)$$

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad y = (y_1, y_2)^T, \quad (14)$$

где H – матрица наблюдения; $\vartheta(k)$ – шум измерений.

Для реализации фильтра Калмана необходимо определить ковариационную матрицу шума системы Q и шума измерений R .

Пусть имеется выборка из n значений управляющих воздействий, накопленная за определенный интервал времени $u_1 = [u_{11}, u_{12}, \dots, u_{1n}]$, $u_2 = [u_{21}, u_{22}, \dots, u_{2n}]$. У каждого из них есть шумовая составляющая $\delta u_1 = [\delta u_{11}, \delta u_{12}, \dots, \delta u_{1n}]$, $\delta u_2 = [\delta u_{21}, \delta u_{22}, \dots, \delta u_{2n}]$. Если объединить векторы δu_1 и δu_2 в $\delta u = [\delta u_1, \delta u_2]$, у которого n строк и два столбца, и умножить его на матрицу N^T , то получится массив шумов w_1, w_2 размерностью $n \times 1$ каждый:

$$\begin{pmatrix} w_1 & w_2 \\ n \times 1 & n \times 1 \end{pmatrix} = \delta u N^T. \quad (15)$$

У ковариационной матрицы Q по главной диагонали расположены дисперсии w_1 и w_2 , остальные элементы – ковариации между компонентами w_1 и w_2 :

$$Q = \begin{pmatrix} \sigma_{w_1}^2 & \text{cov}(w_1, w_2) \\ \text{cov}(w_2, w_1) & \sigma_{w_2}^2 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Аналогично вычисляется ковариационная матрица шумов измерений, где вектора $v_1 = [v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1n}]$, $v_2 = [v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2n}]$ представляют собой массив накопленных за определенное время n значений шума датчиков содержания магнетита в концентрате и хвостах соответственно:

$$R = \begin{pmatrix} \sigma_{v_1}^2 & \text{cov}(v_1, v_2) \\ \text{cov}(v_2, v_1) & \sigma_{v_2}^2 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Максимальное значение шума по первому управляющему воздействию $\delta u_{1\max}$ может определяться, например, зоной нечувствительности хода рабочего механизма клапана, а по второму $\delta u_{2\max}$ – неточностью отработки задания по скорости вращения приводного вала двигателя сепаратора. Примем $\delta u_{1\max} = 3\%$, $\delta u_{2\max} = 0,1 \text{ мин}^{-1}$.

Будем рассматривать белые шумы с нормальным законом распределения и нулевым математическим ожиданием. Согласно «правилу трех сигм» почти достоверно то, что величина ошибки не отклонится по абсолютной величине более чем на 3σ (σ – среднеквадратическое отклонение). Поэтому параметр σ шумов системы будет в три раза меньше $\delta u_{1\max}$ и $\delta u_{2\max}$:

$$\sigma_{w_1} = \frac{\delta u_{1\max}}{3} = 1\%, \quad \sigma_{w_2} = \frac{\delta u_{2\max}}{3} = 0,0333 \text{ мин}^{-1}. \quad (18)$$

Примем наибольшую ошибку измерения показателя обогащения $\delta\beta_{\max}$ равной $0,9\%$, а параметра $\delta v_{\max} = 0,3\%$, тогда

$$\sigma_{v_1} = \frac{\delta\beta_{\max}}{3} = 0,3\%, \quad \sigma_{v_2} = \frac{\delta v_{\max}}{3} = 0,1\%. \quad (19)$$

В пакете MATLAB, приложении Statistics Toolbox, есть встроенные функции, позволяющие вычислять ковариационные матрицы Q и R на основе данных о математическом ожидании и среднеквадратическом отклонении [21].

Алгоритм работы фильтра Калмана состоит из двух этапов [20].

1. Предсказание состояния системы. Происходит вычисление оценок координат $\hat{x}_{\bar{k}} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2)^T$ по результатам предыдущих измерений \hat{x}_{k-1} и вектора управления u_k :

$$\hat{x}_{\bar{k}} = F\hat{x}_{k-1} + Nu_k. \quad (20)$$

Прогноз ошибок оценивания координат состояния определяется ковариационной матрицей P_k :

$$P_k = FP_{k-1}F^T + Q. \quad (21)$$

Матрица P_{k-1} представляет собой ковариационную матрицу ошибок оценивания координат состояния $\delta\hat{x}_k = (\delta\hat{x}_1, \delta\hat{x}_2)^T$, вычисленную на предыдущем такте и состоящую из попарных ковариаций двух компонент данного вектора:

$$P_{k-1} = \begin{pmatrix} \sigma_{\delta\hat{x}_1}^2 & \text{cov}(\delta\hat{x}_1, \delta\hat{x}_2) \\ \text{cov}(\delta\hat{x}_2, \delta\hat{x}_1) & \sigma_{\delta\hat{x}_2}^2 \end{pmatrix}. \quad (22)$$

2. Корректировка вектора состояния. На данном этапе вычисляется коэффициент усиления фильтра Калмана k_k , затем пересчитываются обновленные значение \hat{x}_k и P_k :

$$\begin{aligned} k_k &= P_k H^T (HP_k H^T + R)^{-1}; \\ \hat{x}_k &= \hat{x}_{\bar{k}} + k_k(z_k - H\hat{x}_{\bar{k}}); \\ P_k &= (E - k_k H)P_{\bar{k}}. \end{aligned} \quad (23)$$

Вектор измерений в k -й момент времени обозначен через z_k . Это сигналы с анализаторов содержания магнетитового железа в концентрате и хвостах.

Результаты моделирования, отражающие динамику технологических показателей обогащения β и v , приведены на рис. 1, 2. При этом каждые пять секунд случайным образом изменялись управляющие воздействия: расход воды и частота вращения барабана сепаратора. Временные диаграммы показывают, что оценки фильтром Калмана координат состояния β и v намного точнее, чем показания датчиков.

На рис. 3, 4 представлены графики ошибок измерения магнетитового железа в концентрате и хвостах с использованием алгоритма калмановской фильтрации, вычисляемые по формуле $(d\beta, dv)^T = \hat{x}_k - x_{\text{эТ}}$ и без ее применения, рассчитанные из выражения $(d\beta, dv)^T = z_k - x_{\text{эТ}}$. Вектор $x_{\text{эТ}}$ – эталонные координаты состояния, он определяется из решения дифференциального уравнения (9) без учета шума системы w .

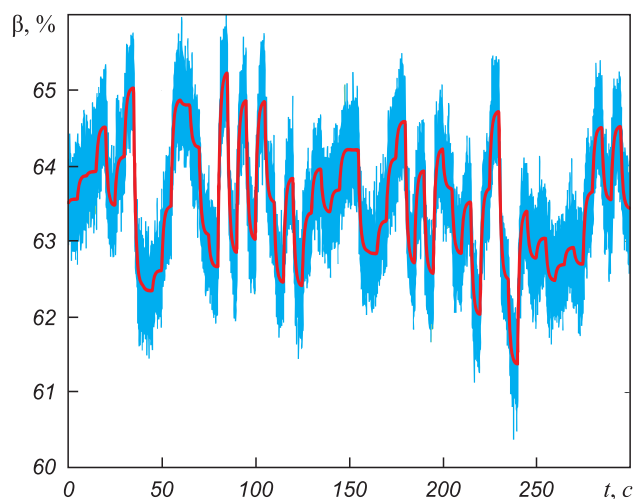


Рис. 1. Показания датчика содержания магнетитового железа в концентрате и его оценка фильтром Калмана: — измерение датчиком; — оценка фильтром Калмана

Fig. 1. Readings of content sensor of magnetite iron in concentrate and its estimation by Kalman filter:

— estimation by sensor; — estimation by Kalman filter

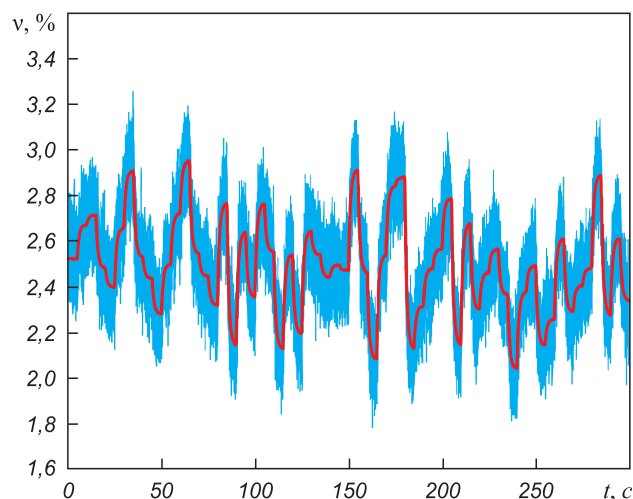


Рис. 2. Показания датчика содержания магнетитового железа в хвостах и его оценка фильтром Калмана: — измерение датчиком; — оценка фильтром Калмана

Fig. 2. Readings of content sensor of magnetite iron in tailings and its estimation by Kalman filter:

— estimation by sensor; — estimation by Kalman filter

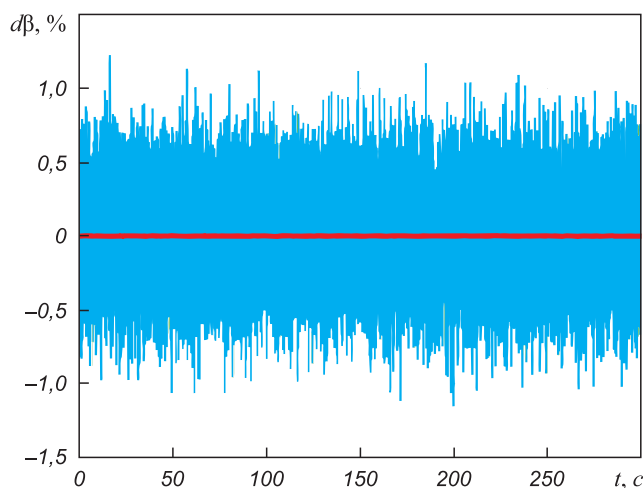


Рис. 3. Ошибки измерения содержания магнетитового железа в концентрате с использованием фильтра Калмана (—) и без него (—)

Fig. 3. Errors in measuring the content of magnetite iron in concentrate using Kalman filter (—) and without it (—)

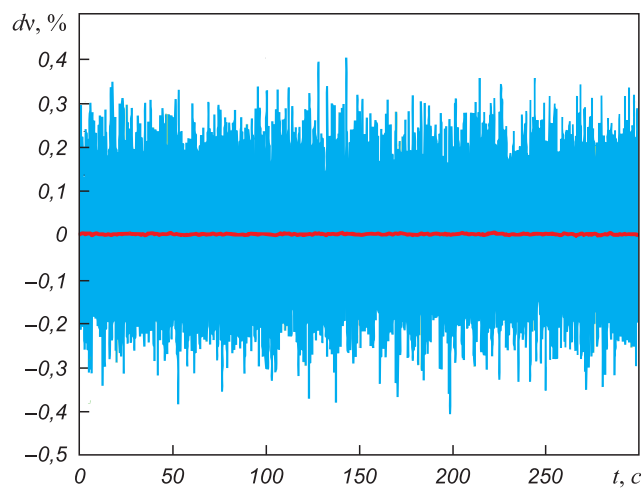


Рис. 4. Ошибки измерения содержания магнетитового железа в хвостах с использованием фильтра Калмана (—) и без него (—)

Fig. 4. Errors in measuring the content of magnetite iron in tailings using Kalman filter (—) and without it (—)

Среднеквадратическая ошибка оценивания содержания железа в концентрате без использования фильтра составила $\sigma_{\Delta\beta} = 0,1806 \%$, а в хвостах $\sigma_{\Delta v} = 0,0605 \%$, при его наличии она уменьшилась до значений $\sigma_{\Delta\beta} = 6,9418 \cdot 10^{-4} \%$ и $\sigma_{\Delta v} = 8,066 \cdot 10^{-4} \%$.

Применение фильтра Калмана в задачах автоматизации и контроля процесса обогащения железных руд позволит повысить точность измерения содержания магнетитового железа в концентрате и хвостах. Вместе с тем, будет обеспечиваться эффективность работы системы автоматического управления магнитным сепаратором за счет повышения качества контроля технологических показателей его работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Детектор анализатор рудоносности железорудной пульпы. Режим доступа: http://www.analyzator.su/detector_rudonosnosti_rufru.php (дата обращения: 08.01.2018).
2. Анализатор содержания магнетита в пульпе АСМ-1. Режим доступа: <http://www.rastr1.com/> Анализатор магнетита (дата обращения 08.01.2017).
3. Воевода А.А., Трошина Г.В. Моделирование фильтра Калмана с обновленной последовательностью в среде SIMULINK: Сб. науч. тр. НГТУ. 2015. № 2(80). С. 7 – 17.
4. Дургарян И.С., Белова О.Н., Лясковская И.В., Пашенко Е.Ф. Применение фильтра Калмана в методе многоступенчатой идентификации // Вестник международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. 2016. Т. 18. № 1. С. 45 – 48.

5. Лемешко О.В. Фильтр Калмана. Теоретические основы и практическое применение // Вестник магистратуры. 2014. № 6 – 1(33). С. 5 – 8.
6. Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews. Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB. Hoboken, 2015. – 640 p.
7. Богданов О.С., Ненарокомов Ю.Ф. Справочник по обогащению руд. Обогащительные фабрики. Т. 4. – М.: Недра, 1984. – 360 с.
8. Кармазин В.И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых: Учебник для вузов. Т. 1. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2005. – 669 с.
9. Кармазин В.И. Обогащение руд черных металлов: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1982. – 216 с.
10. Марюта А.Н., Качан Ю.Г., Бунько В.А. Автоматическое управление технологическими процессами обогащительных фабрик: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1983. – 277 с.
11. Нестеров Г.С. Технологическая оптимизация обогащительных фабрик. – М.: Недра, 1976. – 120 с.
12. Обзор рынка магнитных сепараторов для переработки минерального сырья в России. Режим доступа: www.infomine.ru/files/catalog/501/file_501_eng.pdf (дата обращения: 08.01.2018).
13. Shivakumar I. Angadi, A. Mohanthy, Ho-SeokJeon, S. Prakash, B. Das. Analysis of wet high-intensity magnetic separation of low-grade indian iron ore using statistical technique // Separation Science and Technology. 2012. Vol. 47. Issue 8. P. 1129 – 1138.
14. Moon Jung Cho, Wendy L. Martinez. Statistics in MATLAB: A Primer. Chapman and Hall. CRC Computer Science & Data Analysis, 2014. – 286 p.
15. Wendy L. Martinez, Angel R. Martinez, Jeffrey L. Solka. Exploratory data analysis with MATLAB. CRC Press. Inc, 2017. – 590 p.
16. Баврин И.И., Матросов В.Л. Высшая математика: Учебник для вузов. – М.: Гуманит. изд. центр «Владос», 2003. – 400 с.
17. Мандра А.Г. Анализ связанной системы автоматического регулирования уровня воды в баке системы химводоподготовки. Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book3/10.php> (дата обращения: 08.01.2018).
18. Журомский В.М., Чернокозов В.В. Синтез и моделирование промышленной системы автоматического управления: методические указания. – М.: МГТУ «МАМИ», 2009. – 41 с.
19. Герман-Галкин С. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК: Учеб. пособие для вузов. – СПб.: Корона-Принт, 2017. – 368 с.
20. Певзнер Л.Д. Теория систем управления. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 440 с.
21. Сергиенко А.Б. Список функций Signal Processing Toolbox. Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/signalprocess/book1> (дата обращения: 08.01.2017).

Поступила 21 января 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 5, pp. 372–377.

THE USE OF KALMAN FILTER IN AUTOMATIC CONTROL OF INDICATORS OF IRON ORES MAGNETIC CONCENTRATION

N.V. Osipova

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),
Moscow, Russia

Abstract. The paper presents the current state of the problems of automation and control data of wet magnetic concentration for iron ore mining and processing plants. Data on the measurement errors of modern analyzers and material composition of the pulp are considered. The possibility of using Kalman filter in order to obtain the most accurate information about the content of valuable component in concentrate and tailings of magnetic separator products is shown. The mathematical description of the dynamics of concentration indicators is given in state coordinates in the form of differential equations system. The author has selected maximum allowable and nominal values of the water flow in the separator bath and the rotation frequency of its drum as well as the corresponding data for the mass fraction of iron in magnetite concentrate and tailings, based on the reference information. With MATLAB program of computer simulation the nonlinear static characteristics were composed, reflecting the dependence of technological parameters of the magnetic concentration from control actions. The linearization dynamic model of the system is held using expansion in Taylor series in the neighborhood of the points, corresponding to a nominal operation mode. The transfer functions of control valve of water flow rate of induction motor rotating the drum were calculated. Standard deviations of control parameters affecting the separation process were determined. The calculated ratio are obtained for determining the covariance matrices of the system noise, describing dynamics of indicators of magnetic concentration, and the noise of their measurement by devices that control the content of magnetite iron in concentrate and tails. The presented algorithm of estimating the coordinates of the Kalman filter state consists of two stages: prediction of the system state and adjustment of the state vector. Simulation results of the MATLAB programming environment are presented in the form of time diagrams reflecting the dynamics of technological indicators of concentration,

the evaluation of the Kalman filter and measurement error. The system has been considered in case of random changes of control actions. At the end of the article, the results are summed up, where it is reported that the Kalman filter should be used in tasks of automation and control of the iron ore concentration process.

Keywords: Kalman filter, covariance matrix, normal distribution, three Sigma rule, white noise, variance, standard deviation, magnetic separation, concentrate, tails.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-5-372-377

REFERENCES

1. *Detektor analizator rudonosnosti zhelezorudnoi pul'py* [Detector analyzer ore iron ore pulp]. Available at URL: http://www.analyzator.su/detektor_rudonosnosti_pulpy.php (Accessed: 08.01.2018). (In Russ.).
2. *Analizator sodержaniya magnetita v pul'pe ASM-1* [Analyzer of magnetite content in ASM-1pulp]. Available at URL: http://www.rastr1.com/Analizator_magnetita (Accessed: 08.01.2017). (In Russ.).
3. Voevoda A.A., Troshina G.V. Simulation of Kalman filter with the updated sequence in SIMULINK medium. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU*. 2015, no. 2(80), pp. 7–17. (In Russ.).
4. Durgaryan I.S., Belova O.N., Lyaskovskaya I.V., Pashchenko E.F. Application of Kalman filter in multi-stage identification method. *Vestnik mezhdunarodnoi akademii sistemnykh issledovaniy. Informatika, ekologiya, ekonomika*. 2016, vol. 18, no. 1, pp. 45–48. (In Russ.).
5. Lemeshko O.V. Kalman Filter. Theoretical basis and practical application. *Vestnik magistratury*. 2014, no. 6-1(33), pp. 5–8. (In Russ.).
6. Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews. *Kalman filtering: theory and practice with MATLAB*. Hoboken, 2015, 640 p.
7. *Spravochnik po obogashcheniyu rud. Tom 4: Obogatitel'nye fabriki* [Handbook on ores concentration. Concentrating plants (Vol. 4)]. Bogdanov O.S., Nenarokomov Yu.F. eds. Moscow: Nedra, 1984, 360 p. (In Russ.).

8. Karmazin V.I. *Magnitnye, elektricheskie i spetsial'nye metody obogashcheniya poleznykh iskopaemykh: Uchebnik dlya vuzov. T. 1: Magnitnye i elektricheskie metody obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* [Magnetic, electrical and special methods of mineral processing: Textbook for universities. Vol. 1: Magnetic and electrical methods of mineral processing]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2005, 669 p. (In Russ.).
9. Karmazin V.I. *Obogashchenie rud chernykh metallov: Uchebnik dlya vuzov* [Concentration of ferrous metals ores]. Moscow: Nedra, 1982, 216 p. (In Russ.).
10. Maryuta A.N., Kachan Yu.G., Bun'ko V.A. *Avtomaticheskoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami obogatitel'nykh fabrik: Uchebnik dlya vuzov* [Automatic control of technological processes in concentrating plants: Textbook for universities]. Moscow: Nedra, 1983, 277 p. (In Russ.).
11. Nesterov G.S. *Tekhnologicheskaya optimizatsiya obogatitel'nykh fabrik* [Technological optimization of concentrating plants]. Moscow: Nedra, 1976, 120 p. (In Russ.).
12. *Obzor rynka magnitnykh separatorov dlya pererabotki mineral'nogo syr'ya v Rossii* [Overview of the market of magnetic separators for mineral processing in Russia]. Available at URL: www.infomine.ru/files/catalog/501/file_501_eng.pdf (Accessed: 08.01.2018). (In Russ.).
13. Shivakumar I. Angadi, A. Mohanthy, Ho-Seok Jeon, S. Prakash, B. Das. Analysis of wet high-intensity magnetic separation of low-grade Indian iron ore using statistical technique. *Separation Science and Technology*. 2012. vol. 47, Issue 8. pp. 1129–1138.
14. Moon Jung Cho, Wendy L. Martinez. *Statistics in MATLAB: A Primer*. Chapman and Hall. CRC Computer Science & Data Analysis, 2014, 286 p.
15. Wendy L. Martinez, Angel R. Martinez, Jeffrey L. Solka. *Exploratory data analysis with MATLAB*. CRC Press. Inc, 2017, 590 p.
16. Bavrin I.I., Matrosova V.L. *Vysshaya matematika: Uchebnik dlya vuzov* [Higher mathematics: Textbook for universities]. Moscow: Vldos, 2003, 400 p. (In Russ.).
17. Mandra A.G. *Analiz svyazannoi sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya urovnya vody v bake sistemy khimvodopodgotovki* [Analysis of the coupled system of automatic regulation of water level in the tank of the system of chemical and water treatment]. Available at URL: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book3/10.php> (Accessed: 08.01.2018). (In Russ.).
18. Zhuromskii V.M., Chernokozov V.V. *Sintez i modelirovanie promyshlennoi sistemy avtomaticheskogo upravleniya: metodicheskie ukazaniya* [Synthesis and modeling of industrial automatic control systems: Guidelines]. Moscow: MGTU MAMI, 2009, 41 p. (In Russ.).
19. German-Galkin S. *MATLAB & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [MATLAB & Simulink. Designing mechatronic systems on PC: Manual for universities]. St. Petersburg: Korona-Print. 2017, 368 p. (In Russ.).
20. Pevzner L.D. *Teoriya sistem upravleniya* [Theory of control systems]. St. Petersburg: Lan', 2013, 440 p. (In Russ.).
21. Sergienko A.B. *Spisok funktsii Signal Processing Toolbox* [List of Signal Processing Toolbox function]. Available at URL: <http://matlab.exponenta.ru/signalprocess/book1> (Accessed: 08.01.2017). (In Russ.).

Information about the author:

N.V. Osipova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Automation" (nvo86@mail.ru)

Received January 21, 2018