

СИНТЕЗ АСИМПТОТИЧЕСКОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНЫМ СЕПАРАТОРОМ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ

Аннотация. Дана краткая теоретическая справка об асимптотических наблюдателях координат состояния. Показана структура САУ магнитным сепаратором с использованием наблюдателя массовой доли железа магнетитового в концентрате и хвостах. На основе справочной информации о номинальных режимах работы данного агрегата, были получены статические и динамические характеристики, описывающие взаимосвязь управляющих воздействий и показателей обогащения. Синтезирована замкнутая система управления магнитным сепаратором с наблюдателем и пропорциональным регулятором. Выполнено ее моделирование в пакете MATLAB. Получены переходные процессы массовой доли железа магнетитового в концентрате и хвостах, оцененных наблюдателем и этих же показателей, измеренных датчиками.

Ключевые слова: наблюдатель, фильтр Калмана, регулятор, правило трех сигм, характеристический полином, полюса системы, асинхронный двигатель, магнитная сепарация, концентрат, хвосты.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-153-160

При решении задач автоматического управления технологическими процессами очень часто приходится иметь дело с параметрами, которые невозможно измерить напрямую при помощи приборов либо их показания дают достаточно большую погрешность.

Для устранения данной проблемы в системах можно использовать устройство, позволяющее получить оценку $\hat{x}(t)$ вектора состояния $x(t)$ по измерениям векторов управления $u(t)$ и выхода $y(t)$, являющееся асимптотическим наблюдателем. Причем это возможно, если для любого начального состояния $x(0)$ и для всех $u(t)$ при $t \geq 0$ оценка $\hat{x}(t)$ с ростом времени асимптотически приближается к $x(t)$ [4, 6, 9, 11, 15].

Схожим по своему назначению с наблюдателем является фильтр Калмана. Он обладает возможностью наиболее

точной оценки вектора $x(t)$ на основе зашумленной информации с вектора измерений $y(t)$, связанного с данным вектором через матрицу наблюдения $y(t) = Cx(t)$ [11, 16].

Однако для реализации алгоритма работы фильтра, необходимы знания не только о начальном состоянии, матрицах состояния A , управления B и наблюдения C , но и о шумах системы и измерений. Дисперсию последних в большинстве случаев определить возможно, так как это своего рода погрешности в измерительном канале, прописанные в паспорте приборов.

Шумы системы характеризуют случайные воздействия, нарушающие динамику вектора $x(t)$. Их характеристики не всегда известны, и при синтезе фильтра они часто заданы априорно. Поэтому фильтр Калмана может дать достаточно

хорошие результаты только при наличии информации о шуме системы. К тому же он имеет достаточно сложный вычислительный алгоритм [11, 16].

Для построения наблюдателя достаточно знать лишь желаемый спектр характеристических чисел системы, начальные условия $x(0)$, матрицы A , B и C [11].

В горной промышленности при автоматизации обогатительных процессов наблюдатель нашел применение в работе [13]. Он был разработан для системы управления мельницей мокрого самоизмельчения железной руды с целью восстановления неизмеряемой координаты состояния — твердости горной породы, поступающий на переработку.

Примеров использования наблюдателя в системах контроля таких технологических показателей обогащения как массовая доля железа магнетитового β в концентрате и хвостах ν на сегодняшний день нет.

Объектом исследования в данной статье выбран магнитный сепаратор ПБМ-ПП с полупротивоточной ванной. Он разделяет входной поток железорудной пульпы с частицами по различию их магнитных восприимчивостей на две фракции: концентрат и хвосты. Главной целью является точный контроль параметров β и ν в этих продуктах обогащения [5, 8, 10, 17]. Другая задача за-

ключается в настройке регулятора для стабилизации β и ν . При этом параметр β рекомендуется поддерживать на постоянном уровне, а ν должен принимать значения не выше допустимого [8].

На рис. 1 показана структура САУ магнитным сепаратором с использованием наблюдателя массовой доли железа магнетитового в концентрате и хвостах. В качестве регулирующих воздействий выбраны изменение степени открытия клапана $u_1(t)$ для управления расходом воды W в ванну сепаратора и задания по частоте вращения его барабана $u_2(t)$ [8]. Клапан с электроприводом содержит подсистему управления с обратной связью по положению. Сепаратор имеет асинхронный двигатель с редуктором со встроенной подсистемой управления частотой вращения ω .

Массовая доля магнетитового железа в концентрате β и хвостах ν в выходном потоке магнитного сепаратора непрерывно контролируются датчиками Д1 и Д2 соответственно. Измеренные сигналы $y_1(t)$ и $y_2(t)$ являются зашумленными. Они поступают в наблюдатель, который дает наиболее их точную оценку $\hat{x}_1(t)$ и $\hat{x}_2(t)$. Заданные x_{31} , x_{32} и текущие оцененные значения координат состояния $\hat{x}_1(t)$ и $\hat{x}_2(t)$ подаются на вход регулятора, изменяющего $u_1(t)$ и $u_2(t)$ таким образом, чтобы содержание железа в

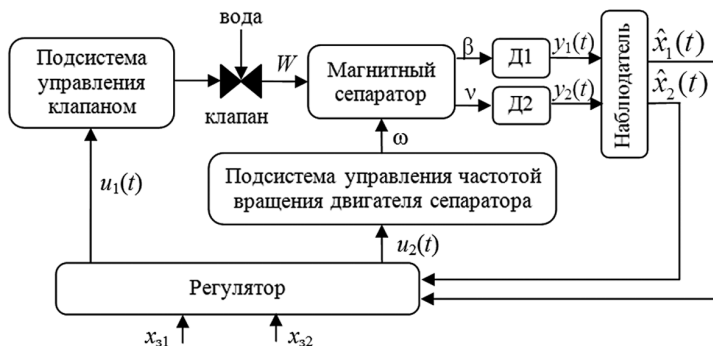


Рис. 1. САУ магнитным сепаратором с использованием наблюдателя массовой доли железа магнетитового в концентрате и хвостах

Fig. 1. ACS magnetic separator using the observer for the mass fraction of iron in the concentrate and tail

концентрате оставалось на заданном уровне, а потери его в хвостах не превышали допустимого значения. Подсистема регулирования положения клапана изменяет процент его открытия в зависимости от управляющей команды $u_1(t)$, осуществляя изменение расхода воды W в сепаратор в большей или меньшей степени. Подсистема регулирования частоты вращения его барабана ω поддерживает входное задание $u_2(t)$.

Рассмотрим более подробно методику построения наблюдателя. В первую очередь, необходимо определить, как связаны координаты состояния и с управляющими воздействиями $u_1(t)$ и $u_2(t)$.

В справочнике по обогащению руд [1] приведены предельные и номинальные режимы работы магнитных сепараторов, в частности, частота вращения барабана, а также технологические показатели фабрик, включая массовую долю магнетитового железа в концентрате и хвостах.

Предположим, что минимальная, номинальная и максимальная частота вращения барабана сепаратора составляют $u_{2\min} = 15 \text{ мин}^{-1}$, $u_{2\text{ном}} = 20 \text{ мин}^{-1}$, $u_{2\max} = 25 \text{ мин}^{-1}$ соответственно. При этом массовые доли железа магнетитового в концентрате пусть будут равны $x_{1\omega\min} = 61,2\%$, $x_{1\omega\text{ном}} = 64\%$, $x_{1\omega\max} = 65,6\%$, а в хвостах $x_{2\omega\min} = 0,93\%$, $x_{2\omega\text{ном}} = 1,05\%$, $x_{2\omega\max} = 3,47\%$.

Выберем значение содержания твердого вещества в питании магнитного сепаратора равным 20% [5], а его номинальный расход — 110 т/ч. Плотность воды известна $\rho = 1 \text{ т/м}^3$, поэтому вычислим номинальный $W_{\text{ном}}$ расход воды в сепаратор:

$$W_{\text{ном}} = ((110 \text{ т/ч}) / (1 \text{ т/м}^3)) \times (100\% / 20\%) = 550 \text{ м}^3/\text{ч} \quad (1)$$

Отклонение содержания твердого во входном потоке пульпы примем $\pm 10\%$. Далее рассчитаем минимальный W_{\min} и максимальный W_{\max} расход воды:

$$W_{\min} = ((110 \text{ т/ч}) / (1 \text{ т/м}^3)) \times (100\% / 20 + 10\%) = 367 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$W_{\max} = ((110 \text{ т/ч}) / (1 \text{ т/м}^3)) \times (100\% / 20 - 10\%) = 1100 \text{ м}^3/\text{ч} \quad (2)$$

Статические характеристики магнитного сепаратора, описывающие его работу в установившемся режиме $x_1 = f_1(W, \omega)$ и $x_2 = f_2(W, \omega)$ проходящие через выше указанные точки, были получены с помощью компьютерного моделирования в среде MATLAB:

$$x_1 = -0,000004W^2 + 0,008W - 0,025\omega^2 + 1,25\omega + 46 \quad (3)$$

$$x_2 = -0,000003W^2 + 0,008W + 0,03\omega^2 - 1,25\omega + 10,8$$

Разложение функций (3) в ряд Тэйлора в окрестности точки $(u_{1\text{ном}}, u_{2\text{ном}})$, привело к линейной модели вида:

$$x_1 = 0,0048W + 0,25\omega + 56,64, \quad (4)$$

$$x_2 = 0,0056W - 0,05\omega - 0,72$$

В динамическом режиме система (4) примет вид:

$$T_c \frac{dx_1(t)}{dt} + x_1(t) = 0,0048W(t) + 0,25\omega(t) + 56,64; \quad (5)$$

$$T_c \frac{dx_2(t)}{dt} + x_2(t) = 0,0056W(t) - 0,05\omega(t) - 0,72$$

где T_c — постоянная времени сепаратора, с.

Расход воды в ванну сепаратора W связан со степенью открытия клапана u_1 через коэффициент $k_{\text{кл}}$ [12]:

$$k_{\text{кл}} = W_{\text{макс}} / 100\% = (1100 \text{ м}^3/\text{ч}) / 100\% = 11(\text{м}^3/\text{ч})/\% \quad (6)$$

следовательно:

$$W = 11u_1 \quad (7)$$

Постоянная времени клапана при математическом описании динамики его открытия составляет порядка $T_{\text{кл}} = 0,3 \text{ с}$ [7]. Передаточная функция регулируемого асинхронного двигателя сепаратора аппроксимируется как инерционное

звено с коэффициентом усиления $k_{AB} \approx 1$ и малой постоянной времени $T_{AB} \ll 1$ с [2]. Следовательно, сигнал задания по частоте его вращения u_2 будет связан с текущей частотой ω через единичный коэффициент передачи:

$$\omega = u_2 \quad (8)$$

Параметр T_{AB} на порядок меньше $T_{\kappa A}$ [2]. Постоянные времени магнитного сепаратора составляют порядка $1 \div 10$ с [10]. Примем $T_c = 1$ с. Пренебрежем инерционностью клапана и двигателя.

Учитывая, что $T_c = 1$ с, подставляя (7), (8) в динамическую модель (5), получим:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -x_1(t) + 0,053u_1(t) + \\ &+ 0,25u_2(t) + 56,64, \quad x(0); \\ \dot{x}_2(t) &= -x_2(t) + 0,062u_1(t) - \\ &- 0,05u_2(t) - 0,72. \end{aligned} \quad (9)$$

В матричной форме система (9) примет вид:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + A, \quad x(0); \quad (10)$$

где:

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0,053 & 0,25 \\ 0,062 & -0,05 \end{pmatrix},$$

$$x = (x_1 \ x_2)^T, \quad (11)$$

$$u = (u_1 \ u_2)^T, \quad A = (56,64 \ -0,72)^T,$$

A — матрица состояния системы; B — матрица управления, c — матрица констант. Вектором выхода будут выступать массовая доля железа магнетитового в концентрате и хвостах, поэтому он будет связан с координатами состояния через матрицу наблюдения, равную единичной матрице E размером 2×2 :

$$y(t) = !x(t), \quad ! = E = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Синтез наблюдателя произведем по методике, изложенной в [11]. Прежде чем его рассчитать, необходимо проверить систему на наблюдаемость по теореме Калмана. Для этого вычисляют ранг матрицы:

$$\text{rank}(C^T : C^T A^T) = 2 \quad (13)$$

Он равен порядку системы (10), следовательно, она является вполне наблюдаемой.

Математическая модель наблюдателя получается из (10) путем замены $x(t)$ на $\hat{x}(t)$ и поправкой вектора состояния на ошибку $y(t) - C\hat{x}(t)$, представляющую собой разницу вектора измерений и того же вектора, вычисленного через произведение матрицы C на оцененный вектор состояния, умноженную на матрицу коэффициентов G :

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + G(y(t) - C\hat{x}(t)) + \\ &+ Bu(t) + c, \quad \hat{x}(0), \quad G = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (14)$$

Главная задача заключается в том, чтобы найти матрицу G .

Собственные числа системы (10) действительные и равны $\lambda_{1,2} = -1$. Выберем полюса наблюдателя чуть левее $\lambda_{н1,2} = -3$. Для нахождения матрицы G приравняют формулу для получения собственных чисел матрицы $(A - GC)$ к желаемому характеристическому полиному системы $\varphi(\lambda_{н1,2})$:

$$\det(\lambda E - A + GC) = (\lambda - \lambda_{н1})(\lambda - \lambda_{н2}). \quad (15)$$

Подставляя символьное выражение G и числовые переменные $\lambda_{н1,2}$ в (15), раскрывая определитель и скобки в правой части, и затем, приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях λ , получим систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} g_{11} + g_{12} = 6, \\ g_{11} + g_{22} + g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21} = 8. \end{cases} \quad (16)$$

Система (16) имеет 2 уравнения и 4 неизвестных, поэтому положим, что $g_{12} = g_{21} = 0$. Откуда находим, что $g_{11} = g_{22} = 2$.

Выбор и настройку регулятора для этой же системы осуществим согласно рекомендациям, приведенным в литературе [11]. Проверка системы на управляемость по формуле:

$$\text{rank}(B : AB) = 2. \quad (17)$$

также дает ранг, равный порядку системы. Поэтому задача синтеза регулятора разрешима. Он должен представлять собой пропорциональный регулятор с законом управления $u(t) = -K\hat{x}(t)$.

Полюса регулятора выберем ближе, чем у наблюдателя $\lambda_{p1,2} = -2$. Для вычисления матрицы K приравняем выражение для получения собственных чисел матрицы $(A - BK)$ к желаемому характеристическому полиному системы $\varphi(\lambda_{p1,2})$:

$$\det(\lambda E - A + BK) = (\lambda - \lambda_{\text{эл}})(\lambda - \lambda_{\text{об}}), K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{pmatrix} \quad (18)$$

Приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях λ , получим:

$$\begin{cases} 2,0 + 0,0528k_{11} + 0,0616k_{12} + \\ + 0,25k_{21} - 0,05k_{22} = 4, \\ 0,0528k_{11} + 0,0616k_{12} + 0,25k_{21} - \\ 0,05k_{22} - 0,01804k_{11}k_{22} + \\ + 0,01804k_{12}k_{21} = 3 \end{cases} \quad (19)$$

Так как число уравнений равно 2, а число неизвестных — 4, примем $k_{11} = k_{22} = 0$. Тогда, находим, что $k_{12} = 22,44$, $k_{21} = 2,4698$. Управляющие воздействия через матрицу K будет вычислены следующим образом:

$$u_1(t) = -k_{12}\hat{x}_2(t), u_2(t) = -k_{21}\hat{x}_1(t). \quad (20)$$

Регулятор, выходные сигналы которого описываются уравнениями (20), позволяет осуществлять стабилизацию лишь в окрестности нулевых условий. Поэтому перепишем систему (9) таким образом, чтобы координатами состояния являлись отклонения содержания магнетитового железа в концентрате и хвостах от заданных значений $\tilde{x}_1 = x_1 - x_{31}$ и $\tilde{x}_2 = x_2 - x_{32}$. Тогда регулятор будет вырабатывать управление, направленное на обеспечение равенства нулю новых координат \tilde{x}_1 и \tilde{x}_2 .

Подстановка $u_{1\text{ном}}$, $u_{2\text{ном}}$ в систему (4) даст значения показателей обогащения, которые примем за заданные:

$x_{31} = 63,56\%$, $x_{32} = 0,52\%$. Содержание магнетитового железа в хвостах большинства обогатительных фабрик России согласно справочным данным в среднем составляет около $v_{\text{ср}} = 2\%$ [1]. Поэтому введем новое требование для снижения потерь в хвостах так, чтобы $x_{32} < v_{\text{ср}}$.

Вычтем из левой и правой части системы (4) $x_{31} = 63,56\%$ и $x_{32} = 0,52\%$:

$$\begin{aligned} x_1 - 63,56 &= 0,0048W + 0,25\omega + \\ &+ 56,64 - 63,56, \\ x_2 - 0,52 &= 0,0056W - 0,05\omega - \\ &- 0,72 - 0,52 \end{aligned} \quad (21)$$

Учитывая динамический режим и то, что $T_c = 1$ с, $\tilde{x}_1 = x_1 - 63,56$, $\tilde{x}_2 = x_2 - 0,52$, $W = 11u_1$, $\omega = u_2$, получим:

$$\begin{aligned} \frac{d(x_1 - 63,56)}{dt} &= -(x_1 - 63,56) + \\ &+ 0,053u_1(t) + 0,25u_2(t) - 6,92, \\ \frac{d(x_2 - 0,52)}{dt} &= -(x_2 - 0,52) + \\ &+ 0,062u_1(t) - 0,05u_2(t) - 1,24 \Rightarrow (22) \end{aligned}$$

$$\dot{\tilde{x}}_1 = -\tilde{x}_1 + 0,053u_1(t) + 0,25u_2(t) - 6,92,$$

$$\dot{\tilde{x}}_2 = -\tilde{x}_2 + 0,062u_1(t) - 0,05u_2(t) - 1,24,$$

$$\tilde{y}(t) = C\tilde{x}(t)$$

Тогда новое уравнение наблюдателя для оценивания координат \tilde{x}_1 и \tilde{x}_2 будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\tilde{x}}}(t) &= A\hat{\tilde{x}}(t) + G(\tilde{y}(t) - C\hat{\tilde{x}}(t)) + \\ &+ Bu(t) + \tilde{c}, \hat{\tilde{x}}(0), \end{aligned} \quad (23)$$

$$\text{где } \tilde{c} = [-6,92 - 1,24]^T$$

Ошибка измерения содержания железа магнетитового в концентрате при помощи лабораторного анализа химическим методом не превышает 0,9%, а в хвостах — 0,3% [3]. Поэтому требуем, чтобы датчик анализировал этот параметр не хуже, чем определяют в лаборатории. Шум измерителей показателей обогащения согласно «правилу трех сигм» [14] найдем для вектора \tilde{y}

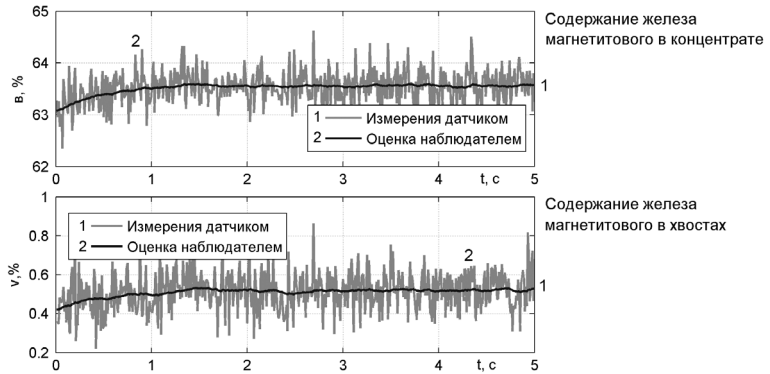


Рис. 2. Стабилизация магнетитового железа в концентрате и хвостах
 Fig. 2. Stabilization of magnetite iron in concentrate and tails

как $\delta \tilde{y} = [0,9 \% / 30,3\% / 3]$. Результаты моделирования САУ магнитным сепаратором с наблюдателем показаны на рис. 2 (стабилизация магнетитового железа в концентрате β и хвостах ν). При этом видно, что наблюдатель работает в режиме фильтра и достаточно точно оценивает координаты состояния. Регулятор поддерживает x_1 на уровне 63,56%, а x_2 — на уровне 0,52%. Частота вращения барабана сепаратора изменяется до номинального значения $\omega_{\text{НОМ}} = 20 \text{ мин}^{-1}$, а степень открытия клапана X снижается до 36,363%, что соответствует расходу воды $W_{\text{НОМ}} = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$ (рис. 3).

Использование наблюдателя для САУ магнитным сепаратором позволило снизить среднеквадратическую ошибку из-

мерения содержания магнетитового железа в концентрате с 0,3% до 0,0116%, а в хвостах — с 0,1% до 0,0044%.

Применение простого пропорционального регулятора, рассчитанного методом аналитического конструирования, привело к упрощению структуры системы управления магнитным сепаратором. Он позволяет осуществлять одновременное воздействие сразу на две входные переменные. Благодаря наблюдателю состояния происходит более точная оценка магнетитового железа в концентрате и хвостах по сравнению с сигналами датчиков. Это улучшит качество управления магнитным сепаратором и позволит получать на обогатительных фабриках продукцию заданного качества.

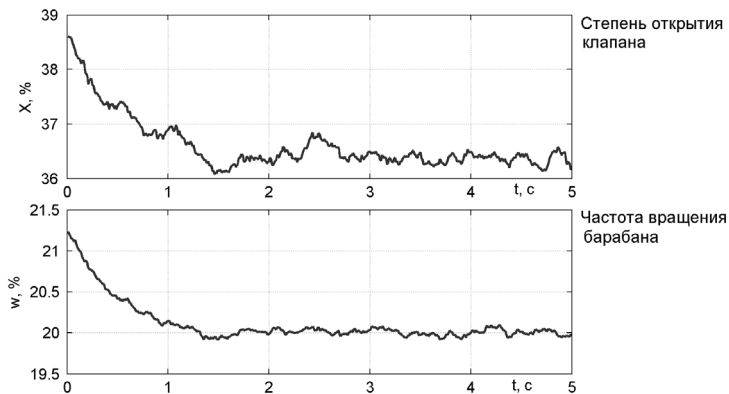


Рис. 3. Изменение степени открытия клапана, регулирующего расход воды в сепаратор и частоты вращения его барабана
 Fig. 3. Changing degree of opening of valve regulating water flow into separator and rotation frequency of its drum

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов О. С., Ненарокомов Ю. Ф. Справочник по обогащению руд. Обогащительные фабрики. Т. 4. — М.: Недра, 1984. — 360 с.
2. Герман-Галкин С. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК: Учебное пособие для вузов. — СПб.: Корона-Принт, 2017. — 368 с.
3. ГОСТ 16589-86. Руды железные типа железистых кварцитов. Метод определения железа магнетита — М., 1986 — 8 с.
4. Есаков В. А., Дудко В. Г., Шлопак А. А. Об одном методе решения задач синтеза оптимальных наблюдателей полного порядка в пространстве состояний // Проблемы современной науки и образования. — 2017. — № 35(117). — С. 9–15.
5. Кармазин В. И. Обогащение руд черных металлов: Учебник для вузов. — М.: Недра, 1982. — 216 с.
6. Макаров Д. А. Синтез управления и наблюдателя для слабо нелинейных систем на основе техники псевдолинеаризации // Моделирование и анализ информационных систем. — 2017. — Т. 24. — № 6. — С. 802–810. DOI: 10.18255/1818-1015-2017-6-802-810.
7. Мандра А. Г. Анализ связанной системы автоматического регулирования уровня воды в баке системы химводоподготовки. URL: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book3/10.php> (дата обращения: 08.01.2018).
8. Марюта А. Н., Качан Ю. Г., Бунько В. А. Автоматическое управление технологическими процессами обогащительных фабрик: Учебник для вузов. — М.: Недра, 1983. — 277 с.
9. Зубов Н. Е., Микрин Е. А., Олейник А. С., Рябченко В. Н. Алгоритмы синтеза линейных наблюдателей для нелинейных динамических систем // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2014. — № 5. — С. 3–16. DOI: 10.7868/S0002338814050151.
10. Нестеров Г. С. Технологическая оптимизация обогащительных фабрик. — М.: Недра, 1976. — 120 с.
11. Певзнер Л. Д. Теория систем управления. — СПб.: Изд-во «Лань», 2013. — 440 с.
12. Журомский В. М., Чернокозов В. В. Синтез и моделирование промышленной системы автоматического управления: методические указания. — М.: МГТУ «МАМИ», 2009. — 41 с.
13. Тараненко М. Е. Автоматизированная система управления технологическим процессом измельчения руды в мельницах мокрого самоизмельчения: Дис. ... канд. техн. наук. — Старый Оскол: СТИ НИТУ «МИСиС», 2010. — 182 с.
14. Pukelsheim F. The Three Sigma Rule, The American Statistician. vol. 48, no. 2, 1994, pp. 88–91. DOI: 10.2307/2684253.
15. Korbicz J., Koscielny J. M., Kowalczyk Z. Fault Diagnosis: Models, Artificial Intelligence, Applications / Wojciech Cholewa Springer Science & Business Media, 2012, 922 p.
16. Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews. Kalman Filtering Theory and Practice with MATLAB. Hoboken, 2015. 640 p.
17. 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, iss. 8. pp. 1129–1138. DOI:10.1080/01496395.2011.644020. **PLAB**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Осипова Нина Витальевна — кандидат технических наук, доцент,
e-mail: nvo86@mail.ru, ИТАСУ НИТУ «МИСиС».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 6, pp. 153–160.

Synthesis of asymptotic observer for magnetic separator control in iron ore processing

Osipova N.V., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
e-mail: nvo86@mail.ru,
Institute of Information Technologies and Automated Control Systems,
National University of Science and Technology «MI SiS», 119049, Moscow, Russia.

Abstract. The theory of asymptotic observers of coordinates is described in brief. An observer and a similar Kalman filter are compared. The structure of the automated control system for a magnetic separator with an observer of iron mass fraction in magnetite concentrate and tailings is described. Based on the reference information on normal operation modes of the equipment, the static and dynamic characteristics of interaction between the control and processing performance are obtained. The closed magnetic separator control system with the observer and proportional regulator is synthesized. The system is modeled with MATLAB. The conversion processes of iron mass fraction in magnetite concentrate and tailings are obtained from the observer and measuring transducers. The modeling shows that application of the observer reduces the mean square error and enhances the accuracy and quality of control.

Key words: observer, Kalman filter, control, three-sigma rule, characteristic polynomial, system poles, asynchronous motor, magnetic separation, concentrate, tailings.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-153-160

REFERENCES

1. Bogdanov O.S., Nenarokomov Yu. F. *Spravochnik po obogashcheniyu rud. Obogatitel'nye fabriki*. T. 4 [Reference book on ore dressing. Processing plants, vol. 4], Moscow, Nedra, 1984, 360 p.
2. German-Galkin S. *Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Matlab & Simulink. Computer design of mechatronic systems: Higher educational aid], Saint-Petersburg, Korona-Print, 2017, 368 p.
3. *Rudy zheleznye tipa zhelezistykh kvartsitov. Metod opredeleniya zheleza magnetita. GOST 16589-86* [Iron ore of the type of ferruginous quartzite. Method to determine iron in magnetite. State Standart 16589-86], Moscow, 1986, 8 p.
4. Esakov V.A., Dudko V.G., Shlopak A.A. Ob odnom metode resheniya zadach sinteza optimal'nykh nablyudateley polnogo poryadka v prostranstve sostoyaniy [An approach to synthesis of optimal observers for complete procedure in problem space]. *Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya*. 2017, no 35(117), pp. 9–15. [In Russ].
5. Karmazin V.I. *Obogashchenie rud chernykh metallov: Uchebnik dlya vuzov* [Ferrous metal ore processing: Textbook for high schools], Moscow, Nedra, 1982, 216 p.
6. Makarov D.A. Sintez upravleniya i nablyudatelya dlya slabo nelineynykh sistem na osnove tekhniki psevdolinearizatsii [Synthesis of control and observer for weakly nonlinear systems based on pseudo-linearization technique]. *Modelirovanie i analiz informatsionnykh sistem*. 2017. vol. 24, no 6, pp. 802–810. [In Russ]. DOI: 10.18255/1818-1015-2017-6-802-810.
7. Mandra A.G. *Analiz svyazannoy sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya urovnya vody v bake sistemy khimvodopodgotovki*. <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book3/10.php> (accessed 08.01.2018).
8. Maryuta A.N., Kachan Yu.G., Bun'ko V.A. *Avtomaticheskoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami obogatitel'nykh fabrik: Uchebnik dlya vuzov* [Automated control over process flow charts at processing plants: Textbook for high schools], Moscow, Nedra, 1983, 277 p.
9. Zubov N.E., Mikrin E.A., Oleynik A.S., Ryabchenko V.N. Algoritmy sinteza lineynykh nablyudateley dlya nelineynykh dinamicheskikh sistem [Linear observer synthesis algorithm for nonlinear dynamic systems]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*. 2014, no 5, pp. 3–16. [In Russ]. DOI: 10.7868/S0002338814050151.
10. Nesterov G.S. *Tekhnologicheskaya optimizatsiya obogatitel'nykh fabrik* [Technological optimization of processing plants], Moscow, Nedra, 1976, 120 p.
11. Pevzner L.D. *Teoriya sistem upravleniya* [Theory of control systems], Saint-Petersburg, Izd-vo «Lan'», 2013, 440 p.
12. Zhuromskiy V.M., Chernokozov V.V. *Sintez i modelirovanie promyshlennoy sistemy avtomaticheskogo upravleniya: metodicheskie ukazaniya* [Synthesis and modeling of automated industrial control system], Moscow, MGU «MAMI», 2009, 41 p.
13. Taranenko M.E. *Avtomatizirovannaya sistema upravleniya tekhnologicheskimi protsessom izmel'cheniya rudy v mel'nitsakh mokrogo samoizmel'cheniya* [Automated control of wet autogenous ore milling process], Candidate's thesis, Stary Oskol, STI NITU «MISiS», 2010, 182 p.
14. Pukelsheim F. The Three Sigma Rule, *The American Statistician*. vol. 48, no. 2, 1994, pp. 88–91. DOI: 10.2307/2684253.
15. Korbicz J., Koscielny J.M., Kowalcuk Z. Fault Diagnosis Models, Artificial Intelligence, Applications. *Wojciech Cholewa Springer Science & Business Media*, 2012, 922 p.
16. Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews. *Kalman Filtering Theory and Practice with MATLAB*. Hoboken, 2015. 640 p.
17. 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, iss. 8. pp. 1129–1138. DOI:10.1080/01496395.2011.644020.