

В. С. Моркун /д. т. н./, Н. В. Моркун /д. т. н./,
А. В. Пикильняк /к. т. н./

Криворожский национальный университет,
г. Кривой Рог, Украина

Формирование автоматического управления интенсивностью ультразвуковых колебаний в процессе флотации

V. S. Morkun /Dr. Sci. (Tech.)/,
N. V. Morkun /Dr. Sci. (Tech.)/,
A. V. Pikilnyak /Cand. Sci. (Tech.)/

Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

Automatic control formation of the ultrasonic oscillations intensity in the flotation process

Цель. Разработка метода адаптивного управления интенсивностью и частотой высокоэнергетического ультразвука, который формируется с помощью ультразвуковой фазированной решетки.

Методика. Рассмотрена задача автоматизации формирования автоматического управления интенсивностью ультразвуковых колебаний в процессе флотации с использованием ПИД регулятора, методов Ляпунова и градиента на базе системы адаптивного управления с эталонной моделью, самонастраивающегося регулятора на основе проекционного итерационного метода Качмажа. Разработан метод адаптивного управления интенсивностью высокоэнергетического ультразвука в заданной точке пространства, формируемого с помощью ультразвуковой фазированной решетки на основе последовательного ортогонального проектирования приближения на гиперплоскости.

Результаты. Показаны результаты компьютерного моделирования процесса ультразвукового воздействия на поток пульпы с помощью адаптивных и ПИД регуляторов при заданной интенсивности и времени переходного процесса, при линейно увеличивающейся скорости потока пульпы. Разработанный метод реализован программно и позволяет поддерживать необходимую интенсивность ультразвукового воздействия в заданной точке рабочего пространства флотомашин с высокой точностью.

Научная новизна работы заключается в том, что разработан метод адаптивного управления интенсивностью высокоэнергетического ультразвука в заданной точке пространства, формируемого с помощью ультразвуковой фазированной решетки на основе последовательного ортогонального проектирования приближения на гиперплоскости, что позволяет поддерживать необходимую интенсивность ультразвукового воздействия в заданной точке рабочего пространства флотомашин с погрешностью, не превышающей 1,2 %.

Практическая значимость состоит в разработке: алгоритмов и программ адаптивного управления параметрами газовой фазы пульпы в процессе флотации. (Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 11 назв.)

Ключевые слова: адаптивное управление, интенсивность, ультразвук, пульпа, флотация.

DOI: 10.33101/S005-4789456

Постановка проблемы. На сегодняшний день наблюдается тенденция автоматизации технологических процессов флотации на основе методов искусственного интеллекта – экспертных систем и технического зрения. Одним из главных элементов управления процессом флотации является формирование необходимого газового режима, а именно функции распределения газовых пузырьков по размерам, которая бы соответствовала функции распределения частиц твердой фазы по крупности. Таким образом, задача управления процессом флотации состоит в том, чтобы сформировать и поддерживать такой рабочий

режим технологических агрегатов, который обеспечивает заданное распределение газовых пузырьков по размерам, которое бы соответствовало распределению частиц твердой фазы пульпы по крупности, и максимально возможную производительность.

С целью формирования необходимого распределения газовых пузырьков по размерам, которое соответствовало бы распределению частиц твердой фазы пульпы по крупности в процессе флотации, предлагается, воздействовать на поток пульпы высокоэнергетическими ультразвуковыми колебаниями с заданными интенсивностью и

частотой, что приведет к изменению концентрации газовых пузырьков и перераспределению их по размерам. Задача настоящего исследования заключается в разработке метода адаптивного управления интенсивностью и частотой высокоэнергетического ультразвука, который формируется с помощью ультразвуковой фазированной решетки.

Хорошо зарекомендовал себя метод комбинированного автоматического управления процессом флотации, в котором стремятся по возможности компенсировать возмущения на входе процесса [1; 2]. При этом измеряют расход исходной пульпы, её плотность, расходы реагента-собирателя и реагента-пенообразователя, содержание твердой фазы в исходной пульпе. На результаты разделения влияют также коэффициент деления реагента-пенообразователя, флотируемость, гранулометрический, фракционный и элементный составы, степень аэрации, дисперсность пузырьков, толщина пенного слоя, уровень пульпы в камерах флотационной машины, степень износа оборудования и др.

Во флотационных процессах существует прочная связь между пузырьками и частицами. Известно, что для распределения частиц по размерам может существовать оптимальное распределение пузырьков. Тогда задача состоит в получении распределения пузырьков и частиц по размерам, которые бы им соответствовали. Ускорить традиционные и реализовать новые процессы в жидких, твердых и газообразных средах возможно путем использования ультразвуковых колебаний высокой интенсивности.

В работе [3] рассматривается поступательное движение под действием градиента давления в поле ультразвука некоторого множества пульсирующих пузырьков различных размеров, равномерно распределенных по пространству в начальный момент времени. Авторами отмечено, что концентрация пузырьков в пучности давления быстро увеличивается, причем, прежде всего, возрастает число наиболее крупных пузырьков. Сделан вывод о том, что функция распределения пузырьков по размерам и в пространстве необратимо изменяется в каждой точке исследуемого объема жидкости под воздействием градиентов давления в неоднородном ультразвуковом поле.

В работах [4-7] приведены результаты моделирования процесса воздействия динамических эффектов высокоэнергетического ультразвука на газовую фазу пульпы с использованием технологии ультразвуковых фазированных решеток, которые позволили получить зависимости параметров распределения газовых пузырьков по размерам от частоты и интенсивности приложенного ультразвукового воздействия. С уче-

том вышеизложенного для реализации способа в рабочей зоне флотационной машины в каждый текущий момент времени с помощью фазированной решетки формируется ультразвуковое воздействие определенной интенсивности и частоты, что позволит получить необходимую функцию распределения газовых пузырьков по размерам в потоке пульпы.

Методика исследований. Изложение основного материала. Для формирования адаптивного управления с эталонной моделью, представим процесс ультразвукового воздействия на газовую фазу с использованием модели пространства состояний, которая может быть представлена в следующем виде [8]:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad (1)$$

где $x(k)$ – $n \times 1$ – вектор состояния (интенсивность); $u(k)$ – $m \times 1$ вектор, определяющий мощность усилителя; A – $n \times n$ матрица системы, включающая термы проводимости и скорости потока пульпы; B – $n \times m$ входная матрица, которая представляет собой эффект воздействия мощности m .

Желательно, чтобы реакция замкнутого контура $x(k)$ процесса ультразвукового воздействия соответствовала отклику $x_m(k)$ эталонной модели, которая может быть представлена в следующем виде:

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u_c(k) \quad (2)$$

где $x_m(k)$ – вектор состояния, представляющий интенсивность модели; $u_c(k)$ – входной вектор, определяющий ввод команд в модель; полиномы A_m и B_m – матрица состояния и входная матрица модели.

Схема системы MRAC показана на рис. 1. Эта система имеет внутренний контур обратной связи, состоящий из объекта управления и регулятора, и внешний контур обратной связи для корректировки параметров регулятора. Параметры изменяются на основе ошибки рассогласования между выходом системы – фактической

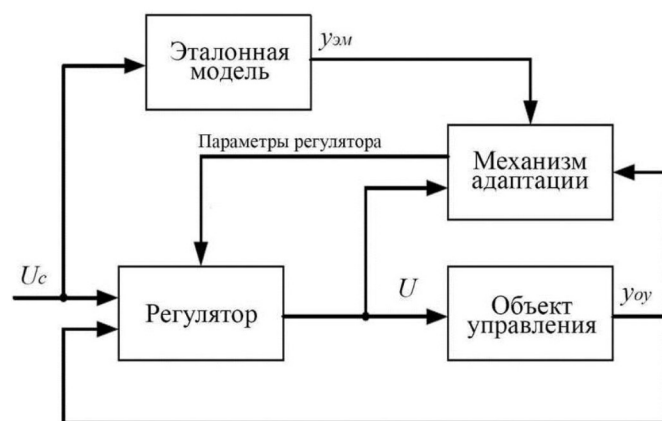


Рис. 1. Блок-схема системы адаптивного управления с эталонной моделью

интенсивности, $I_{факт}$ и выходом эталонной модели – эталонной интенсивности, $I_{эм}$. Рассмотрим два отдельных механизма параметризации [9]. Первый механизм основан на теории устойчивости Ляпунова и дает механизм регулирования, который гарантирует стабильность адаптивной системы с обратной связью. Вторым механизмом основан на методе градиента [10] для настройки параметров регулятора.

Внутренний контур системы MRAC использует общую линейную регулировку, которую можно представить следующим образом

$$u(k) = M(\theta) \cdot u_c(k) - L(\theta)x(k), \quad (3)$$

где M и L – матрицы управления усилением с регулируемыми параметрами θ . С учетом выражений (1)–(3) динамическая модель внутреннего контура системы MRAC может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= (A - BL(\theta))x(k) + BM(\theta)u_c(k) = \\ &= A_c(\theta)x(k) + B_c(\theta)u_c(k). \end{aligned} \quad (4)$$

Пусть e – ошибка между выходом y замкнутого контура системы и выходом $y_{эм}$ модели. Чтобы свести к минимуму ошибки e , параметры θ были скорректированы таким образом, чтобы функция

$$J(0) = \frac{1}{2}e^2, \quad (5)$$

была минимальной.

Как упоминалось ранее, существует два метода для регулирования параметра θ . Рассмотрим сначала метод градиента, для которого зададим параметры в направлении отрицательного градиента J в следующей форме:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta}, \quad (6)$$

где γ – коэффициент усиления адаптации.

Связь между переменной θ и весовой функцией выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} J(\theta) &= |e(\theta)| \\ \frac{d\theta}{dt} &= -\gamma \frac{\partial e}{\partial \theta} \text{sign}(e), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{где } \text{sign}(e) = \begin{cases} 1, & e > 0 \\ 0, & e = 0 \\ -1, & e < 0 \end{cases}$$

С учетом (5), определим закон управления для системы $\frac{Y(s)}{U(s)} = kG(s)$, где k неизвестно. Необходимо, чтобы выражение приобрело вид $\frac{Y(s)}{U_c(s)} = k_0G(s)$, используя объект управления $G_{эм}(s) = k_0G(s)$.

Выберем весовую функцию:

$$J(0) = \frac{1}{2}e^2(\theta) \rightarrow \frac{d\theta}{dt} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta}, \quad (8)$$

Запишем уравнение для ошибки:

$$e = y - y_{эм} = kGU - G_{эм}U_c = kG\theta U_c - k_0GU_c, \quad (9)$$

Подсчет производных «чувствительности» представим в следующем виде:

$$\frac{\partial e}{\partial \theta} = kGU_c = \frac{k}{k_0}y_{эм} : \quad (10)$$

С учетом (6) получим алгоритм адаптивного управления:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\gamma' \frac{k}{k_0}y_{эм}e = -\gamma y_{эм}. \quad (11)$$

Аппроксимация динамики процесса ультразвуковой обработки пульпы как системы второго порядка и применения метода градиента дает закон параметризации, который может быть представлен в следующем виде:

$$\begin{aligned} \theta_1(k+1) &= \theta_1(k) - \gamma \left(\frac{q}{q^2 + a_{m1}q + a_{m2}} U_c \right) e(k+1) \\ \theta_2(k+1) &= \theta_2(k) - \gamma \left(\frac{q}{q^2 + a_{m1}q + a_{m2}} U_c \right) e(k+1) \\ \theta_3(k+1) &= \theta_3(k) - \gamma \left(\frac{q}{q^2 + a_{m1}q + a_{m2}} U_c \right) e(k+1), \quad (12) \\ \theta_4(k+1) &= \theta_4(k) - \gamma \left(\frac{q}{q^2 + a_{m1}q + a_{m2}} U_c \right) e(k+1) \end{aligned}$$

Выбор усиления адаптации имеет решающее значение (рис. 1). Использование адаптивного контроллера на основе метода градиента не дает гарантированно устойчивую систему с обратной связью. Чтобы гарантировать стабильность с обратной связью, рассмотрим способ регулировки, который основан на устойчивости по Ляпунову. В качестве закона параметризации выберем следующее уравнение:

$$\Theta(k+1) = \Theta(k) - \gamma \Psi^T P e(k), \quad (13)$$

где $e(k) = x(k) - x_m(k)$, $\gamma > 0$ – коэффициент усиления адаптации; P – положительно определенная матрица; Ψ – матрица содержащая A_c, B_c, A_m и B_m , с помощью которой можно показать, что система с обратной связью является устойчивой.

Рассмотрим метод адаптивного управления с самонастраивающимся регулятором (*STR – self tuning regulator*), основанный на проекционном методе Качмажа [9; 11].

Важно иметь возможность оценивать параметры процесса адаптивного управления в реальном времени. В адаптивной системе управления адаптивный механизм основан, в первую очередь,

на идентификации системы. Регулятор самонастройки на рис. 2 включает в себя рекурсивное вычислительное устройство для определения параметров системы.

Представим блок объекта управления системой с одним входом и одним выходом SISO (the single input, single output) в следующем виде:

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})(u(t-d_0) + v(t-d_0)) \quad (14)$$

где

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n};$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m};$$

$$m = n - d;$$

y – выход системы;

u – вход;

v – возмущающее воздействие.

Рассмотрим алгоритм вычисления на основе рекурсивной оценки методом наименьших квадратов. Модель процесса (14) можно представить в следующем виде:

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - \dots - a_n y(k-n) + b_0 u(k-d_0) + \dots + b_m u(k-d_0-m) \quad (15)$$

Модель линейна и может быть записана в векторной форме:

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta, \quad (16)$$

где:

$$\theta = [b_0, b_1, \dots, b_m, a_1, a_2, \dots, a_n]^T,$$

$$\varphi(k) = [u(k-d_0), \dots, u(k-d_0-m), -y(k-1), \dots, -y(k-n)]^T.$$

Вычислительное устройство на основе рекурсивной оценки методом наименьших квадратов можно представить в следующем виде:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)], \quad (17)$$

$$K(k) = P(k-1)\varphi(k)(I + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k))^{-1}, \quad (18)$$

$$P(k) = P(k-1) - P(k-1)\varphi(k) \times [I + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)]^{-1} \varphi^T(k)P(k-1) \quad (19)$$

Вышеизложенный алгоритм может быть интерпретирован в следующей форме. Оценку $\hat{\theta}(k)$ получаем путем добавления взвешенного коэффициента прогнозируемой ошибки $y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)$ к предыдущей оценке $\hat{\theta}(k-1)$. Коэффициент $\varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)$ можно рассматривать как величину y в момент времени k , спрогнозированную моделью (16) с предыдущей оценкой $\hat{\theta}(k-1)$. Элементы вектора $K(k)$ являются факторами взвешивания, указывающими, как необходимо комбинировать регулирование и предыдущие оценки. Симметричная ковариационная положительно определенная матрица $P(k)$ может быть представлена в следующем виде: $P(k) = \left(\sum_{i=1}^k \varphi(i)\varphi^T(i) \right)^{-1}$ с начальным условием $P(0) = P_0$. С учетом этого определения видно, что $P(k) = \left(P_0^{-1} \sum_{i=1}^k \varphi(i)\varphi^T(i) \right)^{-1}$. Отметим, что $P(k)$ можно произвольно приближать к $\left(\sum_{i=1}^k \varphi(i)\varphi^T(i) \right)^{-1}$ путем выбора достаточно большого значения P_0 . Большое значение P_0 подразумевает низкую точность первоначальной оценки.

Основная идея состоит в том, чтобы присвоить изменяющейся во времени информации разные степени ее важности. Этот алгоритм может быть представлен в следующем виде:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)]$$

$$K(k) = P(k-1)\varphi(k)(\lambda I + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k))^{-1}, \quad (20)$$

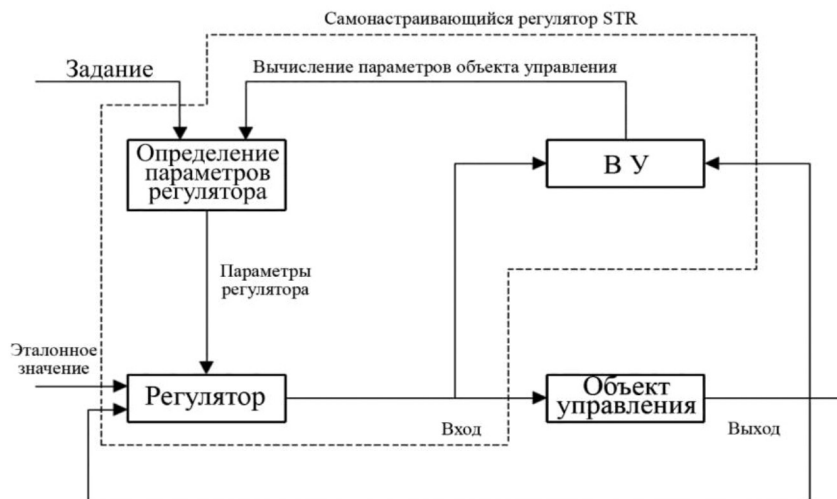


Рис. 2. Блок-схема системы STR

$$P(k) = P(k-1)/\lambda - P(k-1)\varphi(k)\left[I + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)\right]^{-1} \varphi^T(k) \times P(k-1)/\lambda$$

Алгоритм вычисления на основе рекурсивной оценки методом наименьших квадратов требует коррекции вектора параметра θ и ковариационной матрицы P на каждом шаге, что в случае больших размеров вектора θ и матрицы P приводит к длительным и трудоемким вычислениям.

Поэтому целесообразно использовать проекционный итерационный метод Качмажа для решения систем линейных алгебраических уравнений с квадратной невырожденной матрицей путём последовательного ортогонального проектирования приближения на гиперплоскости. Для описания этого алгоритма рассмотрим неизвестный параметр R^n . Выражение $y(k) - \varphi^T(k)\theta$ определяет проекцию вектора параметров θ на вектор $\varphi(k)$. Отсюда, для определения вектора параметров θ необходимо n измерений (где $\varphi(1), \dots, \varphi(n)$ охватывают R^n) [9]. Предположим, что оценка $\hat{\theta}(k-1)$ доступна и получено новое измерение. Поскольку измерение $y(k)$ содержит информацию только в направлении $\varphi(k)$ в пространстве параметров, то естественно выбрать в качестве новой оценки значение $\hat{\theta}(k)$, что сводит к минимуму $\|\hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k-1)\|$ при условии ограничения $y(k) = \varphi^T(k)\hat{\theta}(k)$. Представим множитель Лагранжа $\bar{\alpha}$ для обработки ограничения и тем самым минимизируем функцию:

$$V = \frac{1}{2}(\hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k-1))^T (\hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k-1)) + \bar{\alpha}(y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k)). \tag{21}$$

Взяв производные по $\hat{\theta}(k)$ и $\bar{\alpha}$ получим:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) - \bar{\alpha}\varphi(k) = 0, \tag{22}$$

$$y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k) = 0, \tag{23}$$

Решение этих уравнений можно представить в следующем виде:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{\varphi(k)}{\varphi^T(k)\varphi(k)}(y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)), \tag{24}$$

Эта формула обновления параметров дает возможность изменить длину шага параметризации путем введения коэффициента γ , что дает следующее уравнение:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{\gamma\varphi(k)}{\alpha + \varphi^T(k)\varphi(k)}(y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)), \tag{25}$$

где $\alpha \geq 0, 0 < \gamma < 2$.

Для предотвращения потенциальной проблемы, которая возникает при $\varphi(k) = 0$, знаменатель в поправочном коэффициенте меняется с $\varphi^T(k)\varphi(k)$ на $\alpha + \varphi^T(k)\varphi(k)$, где α положительная константа.

Предположим, что полиномы $A(z^{-1})$ и $B(z^{-1})$ взаимно простые, то есть не имеют никаких общих множителей, и унитарны. То есть коэффициенты при старшей степени равны единице. Главный линейный регулятор может быть представлен в следующем виде:

$$R(z^{-1})u(t) = T(z^{-1})u_c(t) - S(z^{-1})y(t), \tag{26}$$

где $R(z^{-1}), T(z^{-1}), S(z^{-1})$ – полиномы оператора обратного сдвига z^{-1} .

Этот регулятор состоит из прямой связи с передаточным оператором $T(z^{-1})/R(z^{-1})$ и обратной связи с передаточным оператором $S(z^{-1})/R(z^{-1})$. Таким образом, он имеет две степени свободы. На рис. 3 показана блок-схема метода.

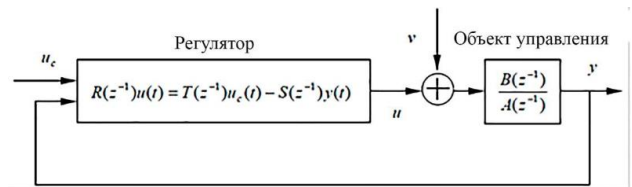


Рис. 3. Главный линейный регулятор с двумя степенями свободы

С учетом (25) и (26), получим:

$$y(t) = \frac{B(z)T(z)}{A(z)R(z) + B(z)S(z)}u_c(t) + \frac{B(z)R(z)}{A(z)R(z) + B(z)S(z)}v(t) \tag{27}$$

$$y(t) = \frac{B(z)T(z)}{A(z)R(z) + B(z)S(z)}u_c(t) - \frac{B(z)S(z)}{A(z)R(z) + B(z)S(z)}v(t) \tag{28}$$

Таким образом, характеристический полином с обратной связью можно представить в следующем виде (для простоты опустим оператор z):

$$A_c = AR + BS, \tag{29}$$

Для вычисления параметров регулятора установившим желаемым характеристическим полином A_c в качестве расчетного параметра.

Определим полиномы R и S путем решения диофантового уравнения (29).

Вычислим полином T , задав другие условия в регуляторе (26), с условием, что реакция сигнала управления на выход системы следует модели:

$$A_m y_m(t) = B_m u_c(t), \tag{30}$$

С учетом выражения (30) должно соблюдаться следующее условие:

$$\frac{BT}{AR+BS} = \frac{BT}{A_c} = \frac{B_m}{A_m}, \quad (31)$$

Из этого условия следует, что реакция системы с обратной связью на сигнал управления определяется моделью (30).

Из (31) следует, что существует аннулирование факторов BT и A_c . Факторизуем полином B в следующем виде:

$$B = B^+ B^-, \quad (32)$$

где B^+ – нормированный полином с устойчивыми нулями и высоким коэффициентом ослабления, соответственно, может быть аннулирован регулятором, B^- – нормированный полином с неустойчивыми нулями и малым коэффициентом ослабления и не может быть аннулирован. Вследствие того, что B^- остается неизменным, примем B^- коэффициентом B .

Тогда:

$$B_m = B^- B'_m. \quad (33)$$

С учетом аннулирования полинома B^+ примем его коэффициентом A_c . Из выражения (31) следует, что A_m также является коэффициентом A_c . С учетом этого характеристический полином A_c с обратной связью может быть представлен в следующем виде:

$$A_c = B^+ A_m A_0. \quad (34)$$

Вследствие того, что полиномы A_c и B имеют коэффициент B^+ , определим коэффициент R :

$$R = B^+ R'. \quad (35)$$

Упростим уравнение (29):

$$AR' + B^- S = A_m A_0 = A'_c. \quad (36)$$

С учетом выражений (32)–(35) выражение (31), примет вид:

$$T = B'_m A_0. \quad (37)$$

Введем следующие условия для полиномов в законе управления (25):

$$\deg S \leq \deg R, \quad (38)$$

$$\deg T \leq \deg R. \quad (39)$$

В случае, когда степень полинома не имеет ограничений, диофантово уравнение (29) имеет много решений, а так как R^* и S^* имеют два конкретных решения, то и следующие полиномы будут иметь решение:

$$R = R^* + MB, \quad (40)$$

$$S = S^* - MA, \quad (41)$$

где M – произвольный полином любой степени.

При наличии огромного количества решений, найдем такое, которое будет получено регулятором минимальной степени. При условии $\deg A > \deg B$, с учетом выражения (29) получим:

$$\deg R = \deg A_c - \deg A. \quad (42)$$

Из выражения (41) можно всегда получить решение, в котором степень полинома S , как правило, $\deg A - 1$, что определяется как решение диофантова уравнения с минимальной степенью. Условие $\deg S \leq \deg R$ обозначает следующее:

$$\deg A_c \geq 2 \deg A - 1, \quad (43)$$

Из выражения (21), условие $\deg T \leq \deg R$ определяет:

$$\deg A_m - \deg B_m \geq \deg A - \deg B = d_0. \quad (44)$$

С учетом вышеизложенного, временная задержка модели должна быть, по крайней мере, такой же, как временная задержка объекта управления. Желательно, чтобы в регуляторе не было дополнительных временных задержек. Это говорит о том, что полиномы R , S и T имеют одинаковые степени. С учетом этого алгоритм управления (алгоритм размещения полюсов наименьшей степени) можно представить в следующем виде.

Определим полиномы A_m , B_m и A_0 при известных полиномах A и B при условии совместимости $\deg A_m = \deg A$; $\deg B_m = \deg B$; $\deg A_0 = \deg A - \deg^+ - 1$; $B = B^+ B^-$.

Алгоритм:

Шаг 1: Представим B в виде $B = B^+ B^-$

Шаг 2: Решим диофантово уравнение для получения R' и S при $\deg S < \deg A$;

$$AR' + B^- S = A_0 A_m$$

Шаг 3: С учетом $R = B^+ R'$ и $T = A_0 B'_m$ рассчитаем сигнал управления из закона управления $Ru = Tu_c - Sy$.

В итоге получим:

$$B^- = B, \quad B_m = \beta B,$$

$$\text{где } \beta = A_m(1)/B(1), \quad \deg A_0 = \deg A - 1, \quad T = \beta A_0.$$

Диофантово уравнение на шаге 2 примет вид $AR + BS = A_c = A_0 A_m \cdot B^+ = 1$

Опишем объект управления следующей формулой:

$$G_p(z^{-1}) = \frac{z^{-d} N(z^{-1})}{D(z^{-1})}, \quad (45)$$

где d – временная задержка, $n \geq m + d$.

$$N(z^{-1}) = \beta_0 + \beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_m z^{-m}, \quad \deg[N(z^{-1})] = m. \quad (46)$$

$$D(z^{-1}) = 1 + \alpha_1 z^{-1} + \dots + \alpha_n z^{-n},$$

$$\deg[D(z^{-1})] = n. \quad (47)$$

На рис. 4 показана блок-схема процесса вычисления.

Предположим, что $u(k)$ и $y(k)$ являются входом и выходом объекта управления, то его модель можно записать в следующем виде:

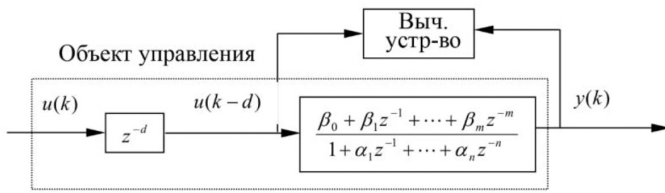


Рис. 4. Блок-схема процесса вычисления

$$y(k) = \beta_0 u(k-d) + \dots + \beta_m u(k-d-m) - \alpha_1 y(k-1) - \dots - \alpha_n y(k-n) \quad (48)$$

или в векторной форме:

$$y(k) = \varphi^T(k) \theta(k), \quad (49)$$

где $\varphi(k) = [u(k-d), u(k-d-1), \dots, u(k-d-m), -y(k-1), -y(k-2), \dots, -y(k-n)]^T \in R^{(n+m+1) \times 1}$

$\theta(k) = [\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T \in R^{(n+m+1) \times 1}$

Закон управления на основе алгоритма размещения полюсов наименьшей степени смоделируем с помощью S-функции в Simulink. Запрограммируем три S-функции для оценки неизвестных

параметров процесса, для расчета параметров контроллера и реализации закона управления. Блок-схема процесса моделирования показана на рис. 5. На этой диаграмме блок S-функции «estimation_block» оценивает параметры процесса.

На рис. 6 показаны результаты компьютерного моделирования процесса ультразвукового воздействия на поток пульпы с помощью адаптивных и ПИД регуляторов при заданной интенсивности 15 Вт/м² и времени переходного процесса 5 мин, при скорости потока пульпы, линейно увеличивающимся от 2 до 10 кг/м³с в течение 30 секунд ультразвукового воздействия.

Время переходного процесса, перерегулирование, рассогласование, полученные при исследовании повышения интенсивности ультразвукового воздействия для трех адаптивных и одного ПИД регулятора приведены в табл. 1. Все три метода достигают заданной интенсивности в течение 5 ± 0,2 с и поддерживают ее с рассогласованием менее 0,3 Вт/м². Отметим, что метод STR имеет меньшее перерегулирование (0,15 Вт/м²), чем

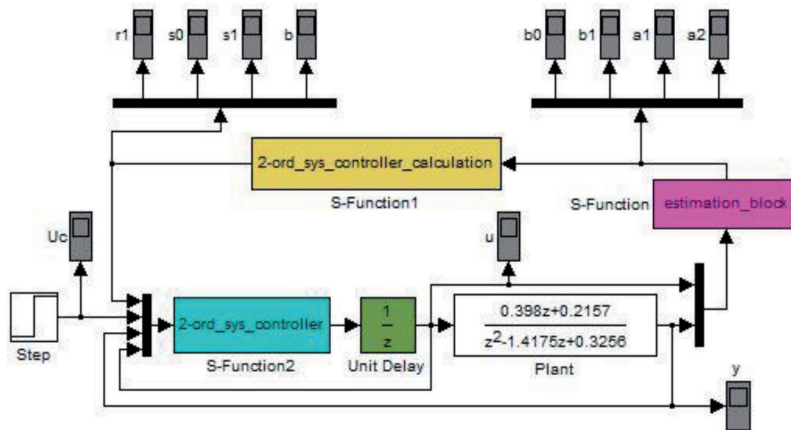


Рис. 5. Блок-схема моделирования системы 2-го порядка

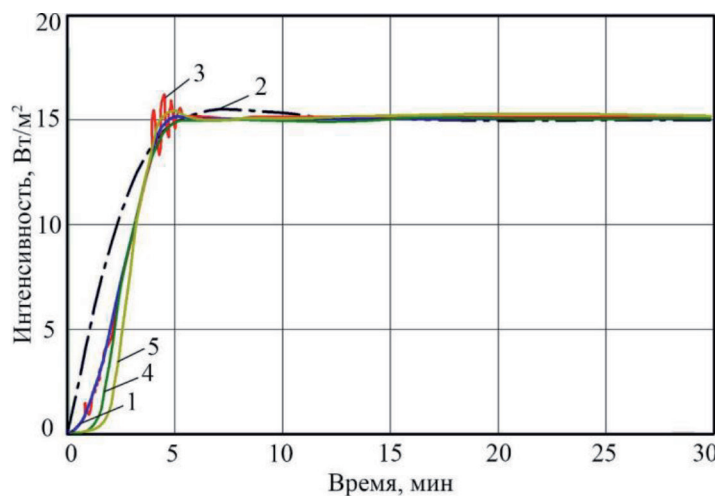


Рис. 6. Зависимость интенсивности от времени в процессе ультразвукового воздействия на поток пульпы: 1 – эталонная интенсивность, 2 – STR управление на основе проекционного алгоритма Качмажа, 3 – ПИД управление, 4 – метод Ляпунова на базе MRAC, 5 – метод градиента на базе MRAC

Характеристики регуляторов

Метод	Время переходного процесса (с)	Перерегулирование (Вт/м ²)	Рассогласование (Вт/м ²)
STR	4,75	0,15	0,1
ПИД	4,95	0,3	0,4
MRAC (градиент)	4,85	0,25	0,15
MRAC (Ляпунов)	4,80	0,25	0,15

два MRAC метода (0,25 Вт/м²), а также позволяет уменьшить длительность переходных процессов в замкнутой системе регулирования на 3–4 %.

Результаты компьютерного моделирования показали, что хотя каждый метод управления поддерживает устойчивую интенсивность, уровень мощности линейно увеличивается в зависимости от времени. Это можно объяснить увеличением скорости потока пульпы, которая уносит часть энергии, и в результате чего необходимо больше входной мощности для поддержания устойчивой интенсивности. Среднее значение перерегулирования для STR метода на основе проекционного алгоритма Качмажа было существенно ниже, чем с использованием MRAC и ПИД методов.

Выводы и перспективы развития направления. Метод с использованием STR показал наилучшие результаты. Таким образом, для автоматического управления интенсивностью ультразвуковых колебаний целесообразно использовать самонастраивающийся регулятор STR на основе проекционного алгоритма Качмажа. Результаты моделирования показали, что этот метод не требует априорного знания параметров пульпы и позволяет поддерживать необходимую интенсивность ультразвукового воздействия в заданной точке рабочего пространства флотомашины с погрешностью, не превышающей 1,2 %, а также уменьшить длительность переходных процессов в замкнутой системе регулирования на 3–4 %.

Библиографический список / References

1. Ульшин В. А. Принцип автоматического управления процессом флотации угольных шлам / В. А. Ульшин, С. К. Шульгин // Праці Луганського відділення Міжн. Акад. інформ. – 2006. – № 1 (12). – С. 98–106.

Ul'shin V. A., Shul'gin S. K. *Printsip avtomaticheskogo upravleniya protsessom flotatsii ugol'nykh shlamov*. Pratsi Lugans'kogo viddilennya Mizhn. Akad. Inform, 2006, no. 1 (12), pp. 98–106.

2. Автоматическое управление процессами флотации и обезвоживания флотационного концентрата с использованием флокулянтов / [В. А. Ульшин, В. К. Кипа, А. И. Золотарев и др.] // Кокс и химия. – 1992. – № 5. – С. 37–41.

Ul'shin V. A., Kipa V. K., Zolotarev A. I. *Avtomaticheskoe upravlenie protsessami flotatsii i obezvozhivaniya flotatsionnogo kontsentrata s ispol'zovaniem flokulyantov*. Koks i khimiya, 1992, no. 5, pp. 37–41.

3. Агрест Э. М. Динамика распределения пузырьков по размерам в акустических полях / Э. М. Агрест, Г. Н. Кузнецов // Акустический журнал. – 1974. – № 20. – С. 345–351.

Agrest E. M., Kuznetsov G. N. *Dinamika raspredeleniya puzyr'kov po razmeram v akusticheskikh polyakh*. Akusticheskiy zhurnal, 1974, no. 20, pp. 345–351.

4. Morkun V. S. Simulation of the Lamb waves propagation on the plate which contacts with gas containing iron ore pulp in Waveform Revealer toolbox / V. S. Morkun, N. V. Morkun, A. V. Pikilnyak // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 5. – P. 16–19.

Morkun V. S., Morkun N. V., Pikilnyak A. V. *Simulation of the Lamb waves propagation on the plate which contacts with gas containing iron ore pulp in Waveform Revealer toolbox*. Metallurgical and Mining Industry, 2014, no. 5, pp. 16–19.

5. Morkun V. S. Adaptive control system of ore beneficiation process based on Kaczmarz projection algorithm / V. S. Morkun, N. V. Morkun, A. V. Pikilnyak // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 2. – P. 35–38.

Morkun V. S., Morkun N. V., Pikilnyak A. V. *Adaptive control system of ore beneficiation process based on Kaczmarz projection algorithm*. Metallurgical and Mining Industry, 2015, no. 2, P. 35–38.

6. Morkun V. S. Iron ore flotation process control and optimization using high-energy ultrasound / V. S. Morkun, N. V. Morkun, A. V. Pikilnyak // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 2. – P. 36–42.

Morkun V. S., Morkun N. V., Pikilnyak A. V. *Iron ore flotation process control and optimization using high-energy ultrasound*. Metallurgical and Mining Industry, 2014, no. 2, pp. 36–42.

7. Morkun V. S. Modeling of ultrasonic waves propagation in inhomogeneous medium using fibered spaces method (k-space) / V. S. Morkun, N. V. Morkun, A. V. Pikilnyak // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 2. – P. 43–48.

Morkun V. S., Morkun N. V., Pikilnyak A. V. *Modeling of ultrasonic waves propagation in inhomogeneous medium using fibered spaces method (k-space)*. Metallurgical and Mining Industry, 2014, no. 2, pp. 43-48.

8. Adaptive Real-Time Closed-Loop Temperature Control for Ultrasound Hyperthermia Using Magnetic Resonance Thermometry / [L. Sun, C. M. Collins, J. L. Schiano et al] // Concepts in Magnetic Resonance Part B (Magnetic Resonance Engineering). – 2005. – Vol. 27B, issue 1. – P. 51–63.

Sun L., Collins C. M., Schiano J. L. *Adaptive Real-Time Closed-Loop Temperature Control for Ultrasound Hyperthermia Using Magnetic Resonance Thermometry*. Concepts in Magnetic Resonance Part B (Magnetic Resonance Engineering), 2005, vol. 27B, issue 1, pp. 51-63.

9. Astrom K. J. Adaptive control / K. J. Astrom, B. Wittenmark. – Boston: Addison-Wesley, 1995.

Astrom K. J., Wittenmark B. *Adaptive control*. Boston, Addison-Wesley, 1995.

10. MRAC Theory [Electronic resource].– Access mode: <http://www.pages.drexel.edu/~kws23/tutorials/MRAC/theory/theory.html>.

11. Wu Z. Simulation study and instability of adaptive control: thesis... Master of Science: "Electrical and Computer Engineering" / Z. Wu. – China, 1996. – 67 p.

Wu Z. *Simulation study and instability of adaptive control: thesis... Master of Science: "Electrical and Computer Engineering"*. China, 1996, 67 p.

Мета. Розробка методу адаптивного управління інтенсивністю і частотою високоенергетичного ультразвуку, який формується за допомогою ультразвукової фазованої решітки.

Методика. Розглянуто завдання автоматизації формування автоматичного управління інтенсивністю ультразвукових коливань у процесі флотації з використанням ПІД регулятора, методів Ляпунова і градієнта на базі системи адаптивного управління з еталонною моделлю, регулятора із самоналаштуванням на основі проєкційного ітераційного методу Качмажа. Розроблено метод адаптивного управління інтенсивністю високоенергетичного ультразвуку в заданій точці простору, який формується за допомогою ультразвукової фазованої решітки на основі послідовного ортогонального проєктування наближення на гіперплощині.

Результати. Показано результати комп'ютерного моделювання процесу ультразвукового впливу на потік пульпи за допомогою адаптивних і ПІД регуляторів при заданій інтенсивності і часі перехідного процесу, при швидкості потоку пульпи, що лінійно збільшується. Розроблений метод реалізований програмно і дозволяє підтримувати необхідну інтенсив-

ність ультразвукового впливу в заданій точці робочого простору флотомашини з високою точністю.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що розроблено метод адаптивного управління інтенсивністю високоенергетичного ультразвуку в заданій точці простору, формованого за допомогою ультразвукової фазованої решітки, на основі послідовного ортогонального проєктування наближення на гіперплощині, що дозволяє підтримувати необхідну інтенсивність ультразвукового впливу в заданій точці робочого простору флотомашини з похибкою, що не перевищує 1,2 %.

Практична значущість полягає в розробці алгоритмів і програм адаптивного управління параметрами газової фази пульпи в процесі флотації.

Ключові слова: адаптивне управління, інтенсивність, ультразвук, пульпа, флотація.

Purpose. The method development of adaptive control of the high-energy ultrasound intensity and frequency, which are formed by means of an ultrasonic phased array.

Methodology. The problem of automatic control automation for the ultrasonic oscillations intensity in flotation process using the PID controller, Lyapunov's and gradient methods based on the adaptive control system with a reference model, self-tuning regulator based on the Kaczmarz projection iteration method is considered. The method of adaptive control of the high-energy ultrasound intensity at a given point in space, which is generated by an ultrasonic phased array based on the successive orthogonal projection of the approximation on a hyperplane is developed.

Findings. The computer simulation results of the ultrasonic exposure on the pulp flow using adaptive and PID regulators with a given intensity and time of the transient process with a linearly increasing pulp flow rate are shown. The developed method is implemented in software and allows to maintain the desired intensity of ultrasound exposure at a given point of flotation machine space with high accuracy.

Originality of the work lies in the fact that a method of adaptive control of the intensity of high-energy ultrasound at a given point in space, formed by using an ultrasonic phased array based on a sequential orthogonal design of the approximation on the hyperplane, has been developed, with error not exceeding 1.2 %.

Practical value consists in the development of algorithms and programs for adaptive control of the parameters of the gas phase of the pulp in the process of flotation.

Key words: adaptive control, intensity, ultrasound, pulp, flotation.

Рекомендована к публикации
к. т. н. Г. И. Еременко

Поступила 20.11.2018