

УДК 621.926:34.16

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., В.М. РАДИОНОВ, аспирант
ГВУЗ «Криворожский национальный университет «

АДАПТИВНАЯ САУ ГИДРОЦИКЛОНОМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ РАЗДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

Предложен подход к описанию трудноформализуемых нелинейных процессов внутри гидроциклона через аналогию поведения частиц твердой фазы пульпы в ультразвуковом поле для моделирования сепарационной характеристики в САУ на основе векторного регулятора

Ключевые слова: разделительные процессы, моделирование, ультразвуковое поле, нелинейные системы.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Развитие систем автоматического управления (САУ) направлено на разработку адаптивных систем, позволяющих обеспечить требуемое качество установившихся и переходных режимов работы управляемых систем для нелинейных объектов, при различных начальных условиях и ограничениях. Широко распространенные линейные регуляторы работают только на линейной или линеаризованной части характеристик с использованием линейных законов управления. В то же время известно, что нелинейные законы управления во многих случаях обеспечивают лучшее качество и более широкий диапазон управления. При создании САУ процессом классификации измельченной руды в гидроциклоне следует учитывать трудности проведения прямых измерений в турбулентном потоке пульпы в режиме реального времени и эмпирический характер зависимостей, основанных на параметрах питания, слива и песков

Анализ исследований и публикаций. В работе [1] нелинейная модель кривой эффективности разделения гидроциклона представлена в виде комбинации линейных субмоделей. Предложено рассматривать данную кривую за основу при формировании заданий регулирования. Очевидно, что для технологического процесса характеризующегося нелинейностью, инерционностью и нестационарностью объекта управления, его оптимизация будет существенно ограничена возможностями линейных регуляторов.

В работе [2] предложен принцип создания систем автоматического управления с применением нелинейных регуляторов, основанный на измерении векторной ошибки с использованием преобразования Гильберта, а также методика настройки коэффициентов регулятора по действительной и мнимой составляющих векторной ошибки в переходном

Сложность математического описания трудноформализуемых нелинейных процессов разделения пульпы в турбулентном потоке гидроциклона обуславливает необходимость создания косвенных моделей. В работе [3] предложено использовать аналогию разделения пульпы под действием центробежных сил с подобным процессом разделения в поле высокоэнергетичного ультразвука, а для моделирования сепарационной характеристики - поведение частиц твердой фазы пульпы в ультразвуковом поле.

Цель исследований. Задачей исследований является оценка возможности использования радиационного давления высокоэнергетического ультразвука для определения характеристики эффективности классификации рудной пульпы в гидроциклоне при формировании управляющего воздействия нелинейным регулятором в адаптивной САУ.

Изложение материала и результаты. Устойчивость и требуемое качество САУ, спроектированной на основе линейной модели, гарантируется лишь в малой, четко не определенной области заданного режима. При больших отклонениях от заданного режима требования к качеству могут не выполняться и САУ может быть неустойчива. Если заданный режим является функцией времени, то линеаризованная модель становится нестационарной и, как следствие, анализ и синтез САУ не намного упрощается. Способы синтеза линейных САУ, основанные на обычной линеаризации, позволяют получить только линейные законы управления. В то же время известно, что нелинейные законы управления во многих случаях обеспечивают лучшее качество управления.

Поэтому, в последние годы усилия разработчиков САУ направлены на проектирование нелинейных пропорционально-интегрально-дифференциальных- (Н-ПИД) регуляторов, позво-

ляющих достичь требуемых свойств САУ для реальных объектов управления в данном случае САУ гидроциклоном-классификатором.

Сложность математического описания трудноформализуемых нелинейных процессов в турбулентном потоке гидроциклона из-за отсутствия эффективных способов измерения текущих показателей в процессе работы, обуславливает необходимость создания прогнозирующих адаптивных моделей, основанных на измерениях входных и выходных характеристиках объекта управления.

В работе [3] для моделирования сепарационной характеристики предложено использовать аналогию разделения частиц твердой фазы пульпы под действием центробежных сил гидроциклона с разделением по гранулометрическому составу в поле высокоэнергетического ультразвука. Под действием высокоэнергетического ультразвука на пульпу, в результате вызванного им радиационного давления, происходит изменение гранулометрической характеристики твердой фазы пульпы в контролируемой зоне. При увеличении интенсивности высокоэнергетического ультразвука от нуля до определенного значения и постоянной скорости потока пульпы в эту зону могут быть смещены все или только определенные классы крупности измельченного материала.

Для того, чтобы экспериментально оценить влияние смещения частиц под действием мощного ультразвука, необходимо определить изменение ультразвукового сигнала частоты ν в направлении, перпендикулярном движению пульпы.

Сформируем два сигнала по результатам измерения интенсивности или амплитуды зондирующей ультразвуковой волны. Один сигнал определим по ослаблению ультразвука интенсивности I в чистой воде I_0 и пульпе I_ν без воздействия высокоэнергетического ультразвука

$$S_0 = \ln \left(\frac{\tilde{I}_0 \pi R^2}{\tilde{I}_\nu} \right) = \frac{Wl}{\mathfrak{N}} \int_0^\infty dr F(r) \sigma(r, \nu), \quad (1)$$

где $\sigma(r, \nu)$ - сечение ослабления ультразвука частотой ν на твердой частице радиуса r ; $F(r)$ - функция распределения частиц по крупности; R - радиус зоны измерений; L - расстояние между источником и приемником ультразвукового сигнала; W - концентрация твердой фазы в пульпе;

Другой - при наличии радиационного давления на частицы пульпы

$$S_1 = \ln \left(\frac{I_0 \pi R^2}{I_\nu} \right) = \frac{Wl}{\mathfrak{N}} \int_0^\infty dr F(r) \sigma(r, \nu) \times \left[\int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} d\rho \tilde{\varphi}(r, \rho) \frac{e^{\alpha z_0}}{e^{\alpha z_0} - \alpha \beta t} St(e^{\alpha z_0} - 1 - \alpha \beta t) \right]. \quad (2)$$

где $\tilde{\varphi}(r, \rho)$ - функция распределения по плотности частиц радиуса r ; α - коэффициент, зависящий от частоты ультразвука; β - усредненная по плотности и крупности частиц величина; t - время воздействия ультразвука.

Найдем отношение этих сигналов

$$\frac{S_1}{S_0} = \frac{\int_0^\infty dr F(r) \sigma(r, \nu) \left[\int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} d\rho \tilde{\varphi}(r, \rho) \frac{e^{\alpha z_0}}{e^{\alpha z_0} - \alpha \beta t} St(e^{\alpha z_0} - 1 - \alpha \beta t) \right]}{\int_0^\infty dr F(r) \sigma(r, \nu)}. \quad (3)$$

Эта величина, как видно из выражения (3), зависит от интенсивности ультразвукового поля, времени воздействия и распределения частиц по плотности и размерам.

Поскольку время воздействия мощного ультразвука зависит от скорости движения пульпы вдоль оси X , то $t \approx h/V$. Таким образом, изменяя взаимное расположение зондирующего канала и ультразвукового поля, можно изменять время воздействия t , а интенсивность ультразвукового поля сказывается, в основном, на значении β .

Выбор интенсивности и частоты мощного ультразвука, расположения зондирующего канала осуществляется на основании максимальной чувствительности величины S_1/S_0 к изменению плотности частиц.

Характеристическая функция [3]

$$S' = \frac{\ln \psi}{\ln I_0 / \langle \xi \rangle} = \frac{Z \int_0^\infty \sigma^2(r) F(r) dr}{V \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr} \quad (4)$$

где

$$\psi = \exp \left\{ \frac{WZ^2 \int_0^\infty \sigma^2(r) F(r) dr}{V \int_0^\infty 4/3\pi r^3 F(r) dr} \right\}; \quad \langle \xi \rangle = I_0 \exp \left\{ \frac{-ZW \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr}{\int_0^\infty 4/3\pi r^3 F(r) dr} \right\}$$

является функцией крупности частиц твердого в пульпе. Таким образом, измеряя интенсивность ультразвукового сигнала I_0 при прохождении им фиксированного расстояния в пульпе $\langle \xi \rangle$, дисперсию $D\xi$ и вычисляя параметр S' , можно определить содержание контрольного класса крупности твердого, например ω_{74} . На рис. 1 приведена расчетная зависимость $S' = f(\omega_{74})$.

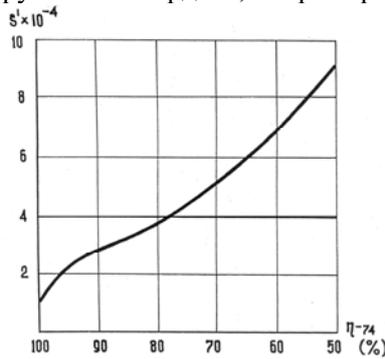


Рис. 1. Зависимость $S' = f(\omega_{74})$

Характеристика эффективности классификации рудной пульпы в гидроциклоне фактически задается вектором в пространстве состояния: концентрация твердой фазы пульпы, ее гранулометрический состав и давление в питающем патрубке гидроциклона, создаваемое насосной станцией [4].

В работе [2] рассмотрен принцип разработки систем управления основанный на определении векторной ошибки регулирования. Векторная ошибка САУ определяется как векторная разность значений вектора уставки и вектора выхода объекта регулирования, что автоматически позволяет учесть запаздывания-опережения в замкнутом контуре регулирования и неизвестный порядок объекта. Изменение управляющего сигнала предложенного регулятора основано на учете модуля и фазы векторной ошибки на каждом такте регулирования.

Сложные САУ с множеством связанных входов-выходов должны создаваться на основе алгоритмов, не требующих подробной априорной информации о многомерном объекте управления и способных выбирать оптимальную структуру и параметры управляющей системы (регулятора), основываясь на непрерывном измерении выходов и прогнозировании (вычислении) переменных состояния системы (рис. 2).

На рис. 2 приняты следующие обозначения: r - вектор заданных уставок, $e = r - y_\Sigma$ - вектор ошибки регулирования, u - вектор управляющих входов, y - вектор выходов объекта регулирования, зависящий от вектора переменных состояния x объекта регулирования, d - вектор возмущений (внешних или внутренних вследствие изменения параметров объекта), y_Σ - измеряемый вектор выходов объекта регулирования под воздействием возмущений. Задачей данной САУ является минимизация целевой функции [2]

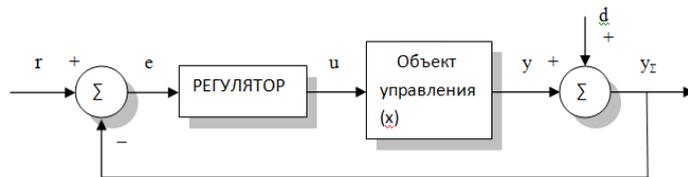


Рис. 2. Многомерная САУ с неполной информацией об объекте управления

$$G(u, e) = \left(\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [u^2 + (r - y_\Sigma)^2] dt \right) \rightarrow \min, \quad (5)$$

в которой учитывается как вектор ошибок регулирования e , так и характер регулирования, определяемый вектором выходов регулятора u (T – интервал управления).

Достижение целевой функции (5) для САУ с неполной информацией о многомерном объекте управления возможно, если осуществлять идентификацию объекта управления и адаптацию регулятора последовательно на тактах интервала управления, улучшая целевую функцию на каждом последующем такте управления, с учетом изменения ошибки управления и параметров режима работы на предыдущих тактах. Для максимального использования «внешней» информации о характере процессов, протекающих в объекте управления, предлагается ввести определение векторной ошибки САУ e , которая является функцией не только разности величин

уставки r и выхода объекта регулирования под воздействием возмущений y_{Σ} , но также и фазового (или временного) смещения, возникающего вследствие опережения-задержки в объекте регулирования $e = r - y_{\Sigma} = e_R + je_I$. При этом модуль векторной ошибки e , ее действительная e_R и мнимая e_I составляющие определяются в соответствии с геометрическими соотношениями [2]

$$e^2 = r^2 + y_{\Sigma}^2 - 2ry_{\Sigma} \cdot \cos(\Delta\phi); \quad e_R = r - y_{\Sigma} \cdot \cos(\Delta\phi); \quad e_I = y_{\Sigma} \cdot \sin(\Delta\phi), \quad (6)$$

где r - модуль вектора уставки, относительно которого определяется смещение выхода объекта, y_{Σ} - модуль выхода объекта регулирования, $\Delta\phi$ фазовое смещение между изменением вектора уставки и вектора выхода объекта регулирования, которое для дискретных САУ может быть определено с использованием величины такта регулирования $\Delta\phi = \kappa T_k$, где κ - номер такта регулирования, T_k - величина такта регулирования. Таким образом, действительная часть векторной ошибки e_R определяется значением в настоящий t момент времени без учета фазового смещения, а мнимая часть векторной ошибки e_I определяется значением при опережении ($t+\Delta\phi$) или задержке ($t-\Delta\phi$) изменения выхода объекта регулирования по отношению к изменению уставки.

С учетом предлагаемого подхода целевая функция САУ с использованием введенной векторной ошибки регулирования может быть переопределена в виде

$$G(u, e, \Delta\phi) = \left(\lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{T} \int_0^T [u^2 + r^2 + y_{\Sigma}^2 - 2 \cdot y_{\Sigma} \cdot r \cdot \cos(\Delta\phi)] dt \right) \rightarrow \min, \quad (7)$$

Поскольку характеристика эффективности разделения гидроциклона наиболее универсально применима для описания процесса классификации целесообразно ее использование в качестве опорной для расчета управляющего воздействия нелинейных регуляторов адаптивной САУ.

На рис. 3 представлена структурная схема САУ с векторным регулятором на основе преобразования Гильберта.

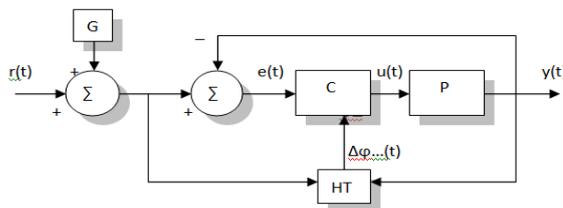


Рис. 3. САУ с векторным регулятором на основе преобразования Гильберта

На рис. 3: G - генератор сигналов, C - регулятор, P - объект управления, HT - блок, вычисляющий на основе преобразования Гильберта разность мгновенных фаз для входных и выходных сигналов, $r_k(t)$ - вектор заданных уставок, $e(t)$ - вектор ошибок регулирования, $u(t)$ - вектор управляющих входов,

$y(t)$ - вектор выходов объекта регулирования, $\Delta\phi_{mk}$ - вектор разностей мгновенных фаз.

Выводы. Использование нелинейных регуляторов для САУ гидроциклоном, использующих динамические эффекты высокоэнергетического ультразвука для идентификации разделительных процессов, является перспективным направлением описания и прогнозирования процесса классификации, синтеза алгоритма формирования управляющих воздействий на основе существующих методов измерения, эффективным способом достижения оптимальных показателей качества технологического процесса обогащения руды.

Список литературы

1. Моркун В.С., Моркун Н.В., Подгородецкий Н.С., Пикильняк А.В. Инициализация гибридной нечеткой модели замкнутого цикла измельчения руды. // Вісник КТУ. - Кривий Ріг: КТУ. - Вип.26, 2010. - С. 290-293.
2. Агамалов О. Н., Лукаш Н. П. Альтернативне нелінійне ПІД-управління з використанням векторної помилки. //Електроінформ, 2008. – №2. – с. 8-13.
3. Моркун В.С., Потапов В.Н., Моркун Н.В., Подгородецкий Н.С. Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов в АСУ ТП обогатительного производства. - Кривой Рог: Изд. центр КТУ, 2007. - 283 с.
4. Тихонов О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. - М.: Недра, 1984, 208 с.

Рукопись поступила в редакцию 21.03.12