

# ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СИСТЕМА С ОБУЧЕНИЕМ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ РЕГУЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОМОЛЬНО-СМЕСИТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

*rubanov@intbel.ru*

Рубанов В.Г., д-р техн. наук, проф.,

Бушуев Д.А., аспирант

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В. Г. Шухова*

**Аннотация.** В статье описана полученная динамическая математическая модель трехкамерного помольно-смесительного агрегата. Приведены результаты расчета параметров автоколебаний для рассмотренной модели на основе метода Гольдфарба и их сравнение с результатами моделирования в MATLAB\Simulink. Показано, что применение экстремальной системы с обучением позволяет снизить значения параметров автоколебаний.

**Ключевые слова:** помольно-смесительный агрегат, колебания, автоматическое подавление, экстремальная система, обучение, метод Гольдфарба.

Одним из направлений работы по гранту РФФИ №14-41-08009 «Синтез адаптивных и нечетких позиционных энергосберегающих систем автоматизации тепло-технологических объектов, машин и механизмов» является разработка и исследование систем автоматического подавления регулярных колебаний центробежных измельчителей [1–5].

Разработанный виртуальный прототип трехкамерного помольно-смесительного агрегата (ПСА) [6] в среде MSC Adams позволил получить динамическую математическую модель колебаний, заданную в форме дифференциальных уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \left( T_{IV} \frac{dh_D(t)}{dt} + h_D(t) \right) = k_{IV} U(t), \\ Q = f(h_D, t) = \begin{cases} k_1(t) \cdot (h_D - h_{D0}(t))^2 + Q_0(t), & h_D < h_{D0}, \\ k_2(t) \cdot (h_D - h_{D0}(t))^2 + Q_0(t), & h_D > h_{D0}, \end{cases} \\ T \frac{dQ_0}{dt} + Q_0 = Q(t - \tau), \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $T_{ИУ}$  – постоянная времени исполнительного устройства (ИУ),  $h_D$  – положение корректирующей массы,  $k_{ИУ}$  – коэффициент передачи исполнительного устройства,  $U$  – управляющее воздействие,  $Q = f(h_D, t)$  – статические характеристики объекта управления,  $k_1, k_2$  – коэффициенты параболы,  $h_{D0}, Q_0$  – координаты минимума унимодальной статической характеристики (ЭХ),  $Q_0$  – выход динамической части объекта управления (ОУ),  $T$  – постоянная времени динамической части ОУ,  $\tau$  – величина запаздывания ОУ.

Для опытно-промышленного образца ПСА численные значения величин, входящих в уравнение  $Q = f(h_D, t)$  системы уравнений (1), найденные для виртуального прототипа с аналогичными параметрами, представлены в таблице 1. Дрейф параметров обусловлен изменением загрузки верхней  $\Delta m_{вк}$ , средней  $\Delta m_{ск}$  и нижней  $\Delta m_{нк}$  помольных камер агрегата. Параметры динамической части ОУ практически не изменяются и равны  $T=0,01$  с,  $\tau = 0,147$  с.

Математическая модель исполнительного устройства с постоянной скоростью перемещения корректирующей массы задана параметрами  $k_{ИУ} = 0,6$ ,  $T_{ИУ} = 0,1$  с.

Для автоматического поддержания экстремума объекта управления, заданного уравнениями (1), обычно проектируются поисковые системы экстремального регулирования (СЭР). Использование поисковых алгоритмов экстремальных систем при действии монотонных возмущений приводит к уменьшению точности поддержания экстремума, дополнительным потерям энергии и снижением надежности за счет необходимости реализации поисковых движений и возникновения за счет этого «потерь на поиск и рыскание» [7]. Согласно [8], СЭР с запоминанием экстремума имеет наименьшую амплитуду колебаний (которая фактически определяется лишь зоной нечувствительности сигнум-реле и динамикой системы) в точке экстремума в процессе поиска по сравнению с другими типами экстремальных регуляторов.

Таблица 1

Загрузка помольных камер	$h_{D0}$ , см	$S_0$ , МКМ	$k_1$	$k_2$
Без загрузки	9,418	253,9	17,8	13,2
$\Delta m_{БК} = 20$ кг, $\Delta m_{СК} = 0$ кг, $\Delta m_{НК} = 0$ кг	9,913	386,8	11,5	11,3
$\Delta m_{БК} = 0$ кг, $\Delta m_{НК} = 20$ кг, $\Delta m_{СК} = 0$ кг	10,498	365,3	12,3	12
$\Delta m_{БК} = 0$ кг, $\Delta m_{НК} = 0$ кг, $\Delta m_{СК} = 20$ кг	11,933	291,8	14,2	14,8

В данной работе приводятся результаты расчета параметров автоколебаний СЭР с запоминанием экстремума и способ их уменьшения за счет применения СЭР с обучением.

Структурная схема СЭР с запоминанием экстремума объекта управления, заданного в виде уравнений (1) без учета дрейфа экстремума, имеет вид, представленный на рис. 1.

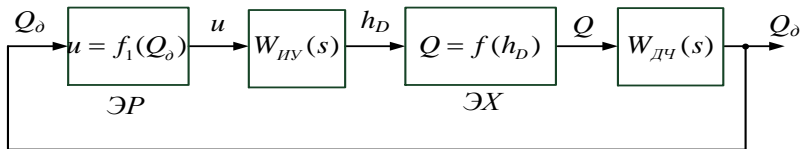


Рисунок 1 – Структура системы экстремального регулирования

Статическая характеристика экстремального регулятора (ЭР) с запоминанием экстремума с переменной  $Q_{min}$ , зоной нечувствительности  $Q_n$  и коэффициентом регулятора  $k_p$  показана на рис. 2.

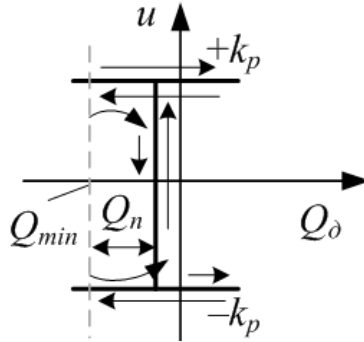


Рисунок 2 – Статическая характеристика экстремального регулятора

Поскольку для такой нелинейной системы выполняется гипотеза структуры и фильтра (так как исполнительное устройство и динамическая часть проявляют свойства фильтра низких частот), то для определения показателя качества экстремальной системы: амплитуды  $a_1$  и частоты  $\omega$  автоколебаний можно воспользоваться методом Гольдфарба [9]. Согласно критерию Найквиста возникновение автоколебательного режима в замкнутой гармонически линеаризованной системе происходит при выполнении следующего условия

$$W_e(j\omega) = -\frac{1}{J_2(a_1)}, \quad (2)$$

где  $W_e(j\omega)$  – эквивалентная частотная характеристика объекта управления с исполнительным устройством, равная

$$W_e(j\omega) = \frac{2k_p(k_1 + k_2)}{\pi} \cdot \left( W_{IV} \left( j \frac{\omega}{2} \right) \right)^2 W_{дч}(j\omega) e^{-j\frac{\pi}{2}}, \quad (3)$$

а  $J_2(a_1)$  – комплексный коэффициент передачи нелинейного звена ЭР  $u = f_1(Q_d)$ , который в результате гармонической линеаризации статической характеристики ЭР может быть определен как

$$J_2(a_1) = \frac{4k_p}{\pi a_1} e^{j \left( \pi - \arcsin \frac{Q_n - a_1}{a_1} \right)}. \quad (4)$$

Для решения уравнения (2) относительно  $a_1$  и  $\omega$  графическим методом построены амплитудно-фазовые характеристики  $W_e(j\omega)$  и

$-\frac{1}{J_2(a_1)}$  (рис.3). В результате этого установлено, что амплитуда колебаний  $a_1 = 5,3$  мкм и частота  $\omega = 1,84$  рад/с и период  $T = \frac{2\pi}{\omega} = 3,35$  с.

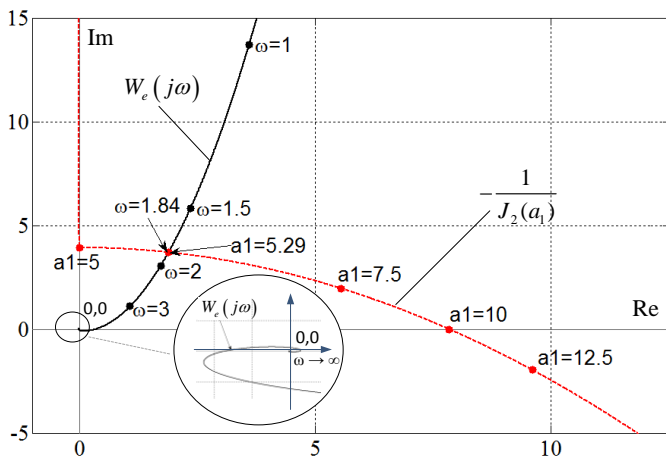


Рисунок 3 – Определение амплитуды и частоты автоколебаний СЭР по амплитудно-фазовым характеристикам

Уменьшения потерь на поиск минимума вибрации, количества переключений исполнительных механизмов и исключения рыскания можно добиться с помощью применения экстремальной системы регулирования с обучением.

Такой подход основывается на следующих свойствах дрейфа статической характеристики ПСА, наблюдаемых при циклической загрузке измельчаемого материала:

- начальное положение статической характеристики, до загрузки материала, и конечное, после выгрузки, практически совпадает для всех циклов загрузки;
- движение равного количества материала со схожими физико-механическими свойствами в результате помола от цикла к циклу, как правило, вызывает идентичный дрейф статической характеристики.

Учитывая эти особенности, система управления (функциональная схема которой представлена на рис.4) на первом цикле загрузки материала, определяемом по сигналу с соответствующей АСУТП,

осуществляет идентификацию дрейфа статической характеристики с помощью проведения обучающего поиска методом запоминания экстремума с постоянной скоростью движения противовесов и зоной реверса, определяемой необходимой помехоустойчивостью. При таком движении траектория дрейфа представляет собой срединное значение проинтегрированных управляющих воздействий, подаваемых на исполнительные механизмы. В процессе обучения запоминаются текущие значения вибрации (в блоке памяти БП1) и проинтегрированные значения управляющих воздействий (в блоке памяти БП2), которые после момента окончания цикла помола (который определяется в компараторе массы КМ при равенстве массы загруженного материала и выгруженного, измеряемых датчиками загрузки ДЗгр и выгрузки ДВгр соответственно) усредняются и запоминаются их срединные значения вместо текущих с помощью блока идентификации дрейфа БИД.

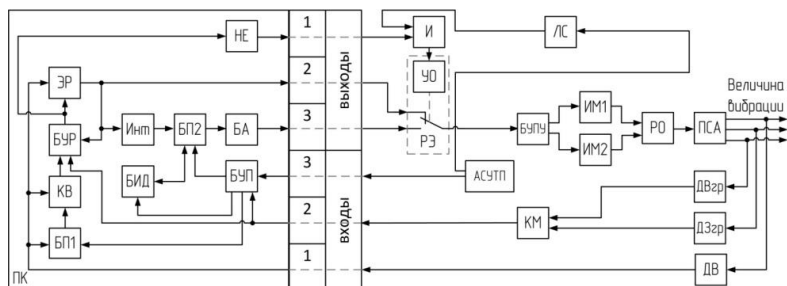


Рисунок 4 – Функциональная схема СЭР с обучением

На последующих циклах после начала цикла загрузки включается программное движение по полученной на первом цикле траектории дрейфа, что вызывает, в случае идентичного дрейфа, движение к экстремуму вибрации без необходимости осуществления поисковых сигналов и потерь на рыскание. При этом постоянно производится сравнение текущего уровня вибрации, определяемого с помощью датчика вибрации ДВ, с аналогичным значением, запомненным на первом цикле. При превышении разности на устанавливаемую зону нечувствительности, определяемую из условия допустимой погрешности отклонения, с помощью компаратора вибрации КВ включается система поиска экстремума вибрации на три поисковых движения с последним движением, равным по времени половинному интервалу предыдущего движения, что способствует снижению ошибки

слежения за экстремумом, накопленной в результате программного движения.

Алгоритм управления комбинированной системы закладывается в программируемый контроллер реального времени ПК. В нем реализуется два канала управления. Первый канал содержит экстремальный регулятор ЭР, который в зависимости от состояния блока управления регулятором БУР, может работать в режиме постоянного поиска или в режиме трех поисковых движений с последним движением, равным по времени предыдущему. Второй канал преобразует проинтегрированные интегратором Инт импульсы управления в блоке БА в задание направления и скорости движения регулирующего органа РО (посредством блока усилительно-преобразовательных устройств БУПУ и исполнительных механизмов ИМ1, ИМ2). Блок управления памятью БУП определяет режимы работы блоков памяти БП1 и БП2. Переключение каналов осуществляется при помощи релейного элемента РЭ в зависимости от инвертированного сигнала БУР и состояния логической схемы ЛС, на которую приходит сигнал загрузки с соответствующей АСУТП.

Моделирование работы СЭР с обучением для объекта заданного в форме уравнений (1) проводилось в среде MATLAB\Simulink. На рис. 5 представлены результаты работы системы на первом цикле загрузки, на котором работает экстремальный регулятор с запоминанием экстремума, в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 1. Как видно из рис. 5,а параметры автоколебаний при отсутствии дрейфа экстремума ( $t=10..20$  с) равны  $a_1 = 6,31$  мкм,  $T = 3,415$  с, что с небольшой погрешностью соответствует полученным ранее значениям по методу Гольдфарба, который является приближенным.

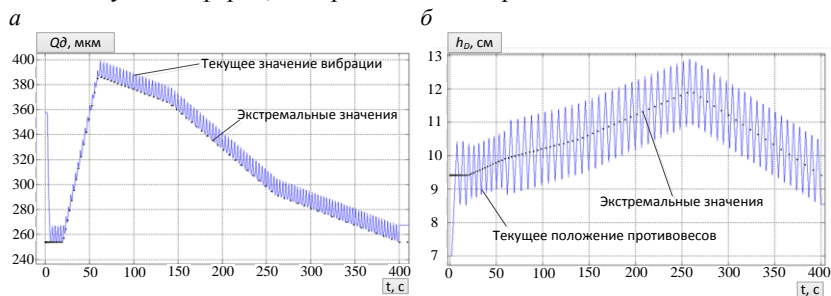


Рисунок 5 – Моделирование динамики работы СЭР с обучением (первый цикл загрузки): а – выходной сигнал ОУ; б – входной сигнал ОУ

На рис. 6 представлены результаты работы системы на втором цикле загрузки, на котором происходит движение по траектории дрейфа экстремума, полученной в результате обучения на первом цикле загрузки.

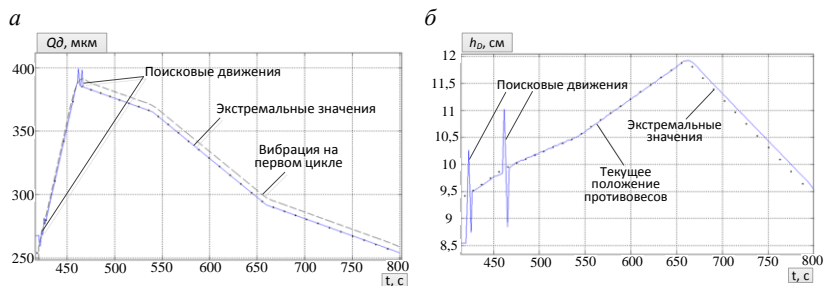


Рисунок 6 – Моделирование динамики работы СЭР с обучением (второй цикл загрузки): *a* – выходной сигнал ОУ; *б* – входной сигнал ОУ

Включение экстремального регулятора для осуществления трех поисковых движений на втором цикле загрузки обусловлено наличием отклонения траектории дрейфа от траектории, полученной на этапе обучения. В результате такого включения ошибка, накопленная при движении по измененной траектории дрейфа, компенсируется.

При изменении массы загрузки, характеристик измельчаемого материала или частых включений экстремального регулятора в режиме программного движения АСУТП (см. рис.4) может включать новый цикл обучения. При этом в случае изменения массы или вида материала полученная траектория дрейфа сохраняется в программируемом контроллере и может быть использована при следующей загрузке однотипного материала.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08009/15 «р\_офи\_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.*

#### Список литературы:

1. Рубанов В.Г., Бушуев Д.А., Стативко С.А. О способах автоматического подавления регулярных колебаний в помольно-смесительном агрегате / Сборник трудов региональной научно-технической конференции по итогам конкурса фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого РФФИ и Правительством



- Белгородской области // БГТУ. им. В.Г. Шухова. (Белгород 9–10 апр. 2015 г.), Белгород: Изд-во БГТУ. 2015. С. 384–388.
2. Бушуев Д.А., Рубанов В.Г. Моделирование динамики экстремальной системы автоматической балансировки центробежного помольно-смесительного агрегата // Приборы и системы. 2014. №11. С. 29–35.
  3. Бушуев Д.А., Рубанов В.Г. Комбинированная система автоматического подавления вибрации центробежного помольно-смесительного агрегата / Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2015). // СПбГЭТУ «ЛЭТИ». (Санкт-Петербург 28-30 октября 2015 г.), СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. С. 367-370.
  4. Пат. 2542531 Российская Федерация, В02С25/00, В02С17/00, G01M1/00 Устройство и способ автоматического подавления вибрации помольно-смесительного агрегата / Рубанов В.Г., Стативко С.А., Стативко А.А., Уральский В.И., Немыкин Е.В. Заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. Оpubл.: 20.02.2015. Заявка: 2013149882/13, 07.11.2013.
  5. Пат. 2567158 Российская Федерация, В02С25/00, В02С17/00, G01M1/38. Устройство и способ автоматической балансировки помольно-смесительного агрегата / Рубанов В.Г., Уральский В.И., Стативко С.А., Стативко А.А., Магергут В.З. Заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. Оpubл. 10.11.2015. Заявка: 2014134040/13, 19.08.2014. Бюл. №31
  6. Севостьянов В.С., Уральский В.И., Сеница Е.В. Центробежный помольно-смесительный агрегат // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2005. № 11. С. 215–217.
  7. Тюкин И. Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах. М.: Изд. ЛКИ, 2014. 384 с.
  8. Анисимов И.В. Основы автоматического управления технологическими процессами нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. Ленинград.: Изд. Химия, 1967. 408 с.
  9. Казакевич В.В., Родов А.Б. Системы автоматической оптимизации. М.: Изд. Энергия, 1977. 288 с.