

УДК 681.513.4

Д. А. Бушуев, В. Г. Рубанов
 Белгородский государственный технологический
 университет им. В. Г. Шухова

Экстремальная комбинированная система автоматического подавления вибрации центробежного помольно-смесительного агрегата

Рассмотрена экстремальная комбинированная система автоматического подавления вибрации помольно-смесительного агрегата, включающая экстремальный регулятор и программную систему с обучением. Описан виртуальный прототип агрегата и представлено математическое описание объекта управления на основе данных полученных при моделировании с помощью среды Adams. Приведены модель комбинированной системы в среде MatLab-Simulink и результаты моделирования.

Вибрация, автоматическое подавление, помольно-смесительный агрегат, экстремальный регулятор, виртуальный прототип, комбинированная система

Основным фактором, ограничивающим применение в промышленности центробежного помольно-смесительного оборудования, является невысокая надежность, вызванная в основном высокой интенсивностью протекающих в нем динамических процессов. К таким агрегатам относится разработанный в БГТУ им. В. Г. Шухова на кафедре теории машин и механизмов трехкамерный помольно-смесительный агрегат (ПСА), в котором согласно кинематической схеме кривошипно-ползунного механизма, реализованной на основе эксцентрикового вала (рис. 1), верхняя

помольная камера движется поступательно, средняя – плоскопараллельно по эллиптической траектории, а нижняя вращается по окружности. Таким образом обеспечивается избирательное динамическое воздействие на измельчаемый материал и в целом более высокая удельная производительность по сравнению с шаровыми и вибрационными мельницами [1].

В первоначальной конструкции данного агрегата применяется способ частичного статического уравнивания кривошипно-ползунного механизма с помощью фиксированно расположенных

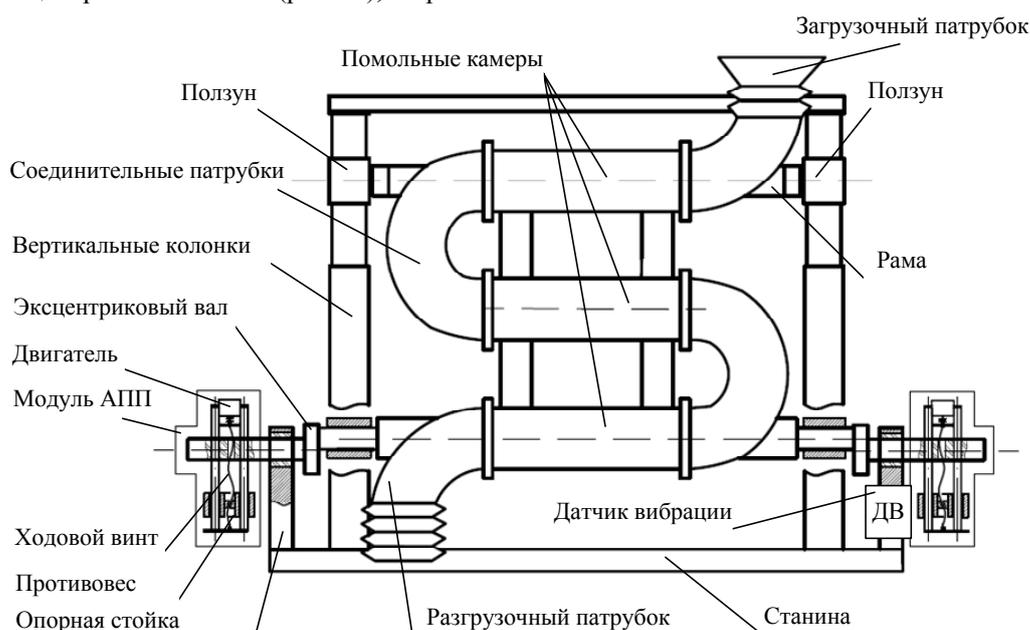


Рис. 1

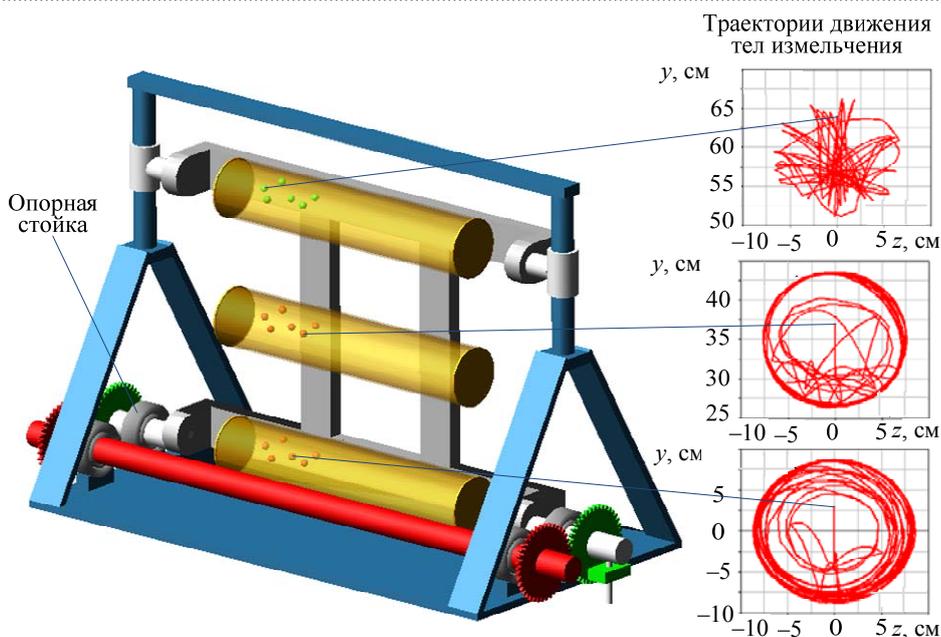


Рис. 2

противовесов. Как известно, данный способ не обеспечивает полного уравнивания не только сил инерции, но и их моментов. И помимо этого, оптимальное положение противовесов, соответствующее минимуму вибрации дрейфует, так как в процессе помола происходит неподдающееся контролю изменение загрузки помольных камер, вследствие перемещения материала (что особенно характерно в периодическом режиме работы ПСА). Также сказывается изменение режимов работы агрегата, износ мелющих тел и футеровки. В результате этого изменяется эксплуатационный дисбаланс вращающейся системы, что приводит к увеличению негативных колебаний деталей и узлов агрегата и снижению их надежности вследствие возрастания интенсивности усталостных явлений. С целью учета этих особенностей агрегата на кафедре технической кибернетики (БГТУ им. В. Г. Шухова) разрабатываются системы автоматического подавления вибрации, в которых с помощью модулей автоматического перемещения противовесов (АПП) в соответствии с информацией, получаемой с датчика вибрации, изменяется уравнивающее

воздействие в процессе работы агрегата [2], [3]. Данные модули АПП осуществляют изменение положения противовеса либо с использованием внешней энергии, подводимой на размещаемые на эксцентриковом валу двигателя постоянного тока (рис. 1) [2], либо за счет существующей энергии вращения эксцентрикового вала посредством специального модульного устройства на основе дифференциального механизма и тормозных электромагнитных муфт [3].

Объектом управления в таких мехатронных системах является процесс уравнивания с выходными переменными в виде среднеквадратичных значений (СКЗ) виброперемещений узлов и деталей агрегата S и входными в виде изменяющихся положений противовесов h_D . Для получения модели объекта управления был построен виртуальный прототип опытно-промышленного образца ПСА (рис. 2) в среде виртуального моделирования сложных машин и механизмов ADAMS.

Параметры узлов и деталей виртуального прототипа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование	Масса, кг	Осевые моменты инерции, кг · см ²		
		I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}
Помольные камеры, A, B, C	18.3	$1.38 \cdot 10^4$	$1.38 \cdot 10^4$	1014
Противовесы, D	7.5	79.6	63.8	26.3
Эксцентриковый вал	18.6	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	142
Дополнительный вал	33.6	$9 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$	206
Рама	41.6	$7.38 \cdot 10^4$	$3.87 \cdot 10^4$	$3.55 \cdot 10^4$
Станина	277	$1 \cdot 10^6$	$8.75 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$
Ползуны	4.26	129	117	47

Результаты расчета в среде ADAMS показали, что траектория движения мелющей нагрузки (рис. 2) в помольных камерах совпадает с полученной в работе [1], а частотные спектры колебаний опорной стойки (СКЗ виброперемещения) виртуального прототипа ПСА схожи в плане первой гармоники и частот остальных с аналогичными спектрами, полученными в результате экспериментов с реальным опытно-промышленным агрегатом при соответствующей загрузке телами измельчения (рис. 3).



Рис. 3

Математическую модель виртуального прототипа с исполнительным устройством в первом приближении была представлена в виде модели Винера, в которой динамическая часть располагается до нелинейного элемента. Идентификация параметров объекта управления проводилась по следующей процедуре [4]:

1. Снимались статические характеристики системы при загрузке измельчаемым материалом массой 20 кг поочередно в каждую помольную камеру начиная с верхней, т. е. начальная загрузка верхней камеры $\Delta m_{в.к} = 20$ кг, а загрузка средней $\Delta m_{с.к}$ и нижней $\Delta m_{н.к}$ равны нулю (табл. 2).

2. Выделялся линейный участок характеристики.

3. На линейном участке производилась идентификация динамической части объекта подачи ступенчатого воздействия на исполнительное устройство с известным математическим описанием.

В результате аппроксимации по методу наименьших квадратов были найдены коэффициенты статических характеристик (табл. 1), заданных в виде

$$y = f(h_D, k_1, k_2) = \begin{cases} k_1 (h_D - h_{D0})^2 + S_0, & h_D < h_{D0}, \\ k_2 (h_D - h_{D0})^2 + S_0, & h_D > h_{D0}, \end{cases}$$

где h_{D0} , S_0 – координаты минимума функции; k_1 , k_2 – искомые коэффициенты, найденные в процессе минимизации.

Таблица 2

Загрузка помольных камер, кг	h_{D0} , см	S_0 , мм	k_1	k_2
Без загрузки	9.418	0.2539	0.0178	0.0132
$\Delta m_{в.к} = 20$, $\Delta m_{с.к} = 0$, $\Delta m_{н.к} = 0$	9.913	0.3868	0.0115	0.0113
$\Delta m_{в.к} = 0$, $\Delta m_{с.к} = 20$, $\Delta m_{н.к} = 0$	10.498	0.3653	0.0123	0.0120
$\Delta m_{в.к} = 0$, $\Delta m_{с.к} = 0$, $\Delta m_{н.к} = 20$	11.933	0.2918	0.0142	0.0148

При идентификации динамической части по адаптивному методу Ньютона–Гаусса [5] с помощью модуля расширения System Identification Toolbox пакета MatLab определено, что с точностью 98.28 % динамическая часть может быть аппроксимирована аperiодическим звеном первого порядка с запаздыванием:

$$W_{д.ч}(s) = \frac{e^{-\tau s}}{(Ts + 1)} = \frac{e^{-0.147s}}{(0.01s + 1)},$$

где s – оператор Лапласа; T – постоянная времени объекта; τ – транспортное запаздывание.

Для управления такими объектами обычно проектируются системы экстремального регулирования [6]. Однако 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].

В данной статье описывается способ уменьшения потерь на поиск минимума вибрации, количества переключений исполнительных механизмов и исключения рыскания, основанный на применении экстремальной комбинированной автоматической системы управления, включающей экстремальный регулятор и программную систему с обучением.

Такой подход основывается на следующих свойствах дрейфа статической характеристики ЦПСА 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, идентифицирует дрейф 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 (определяемого в компараторе массы КМ при равенстве масс загруженного и выгруженного материалов, измеряемых датчиками загрузки ДЗгр и выгрузки ДВгр соответственно), усредняются и запоминаются их срединные значения вместо текущих с помощью блока идентификации дрейфа БИД.

На последующих циклах после начала цикла загрузки включается программное движение по полученной на первом цикле траектории дрейфа, что в случае идентичного дрейфа вызывает движение к экстремуму вибрации без необходимости осуществления поисковых сигналов и потерь на рыскание. При этом постоянно сравнивается текущий уровень 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.

Работа комбинированной системы моделировалась в среде MatLab-Simulink. Общий вид модели системы представлен на рис. 5. Объект управления задается в виде подпрограммы GMU, структура

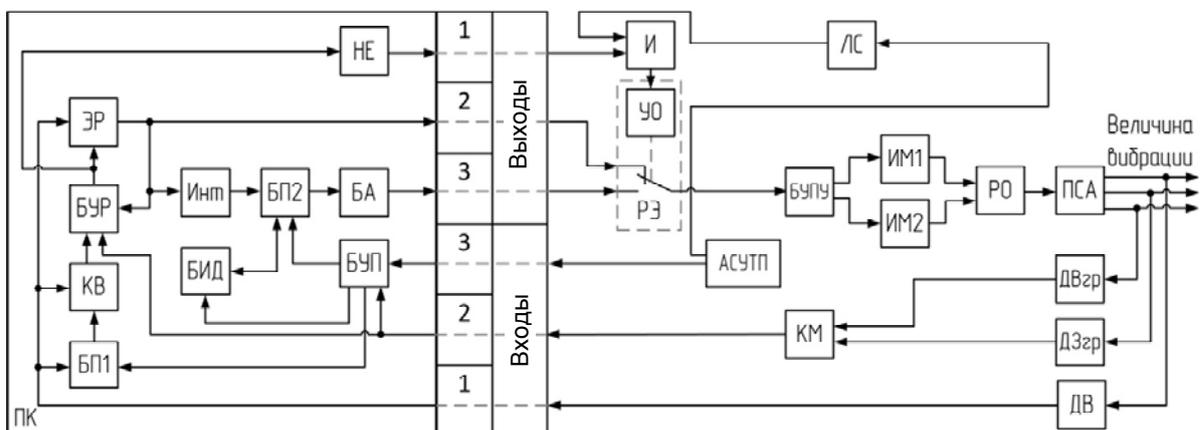


Рис. 4

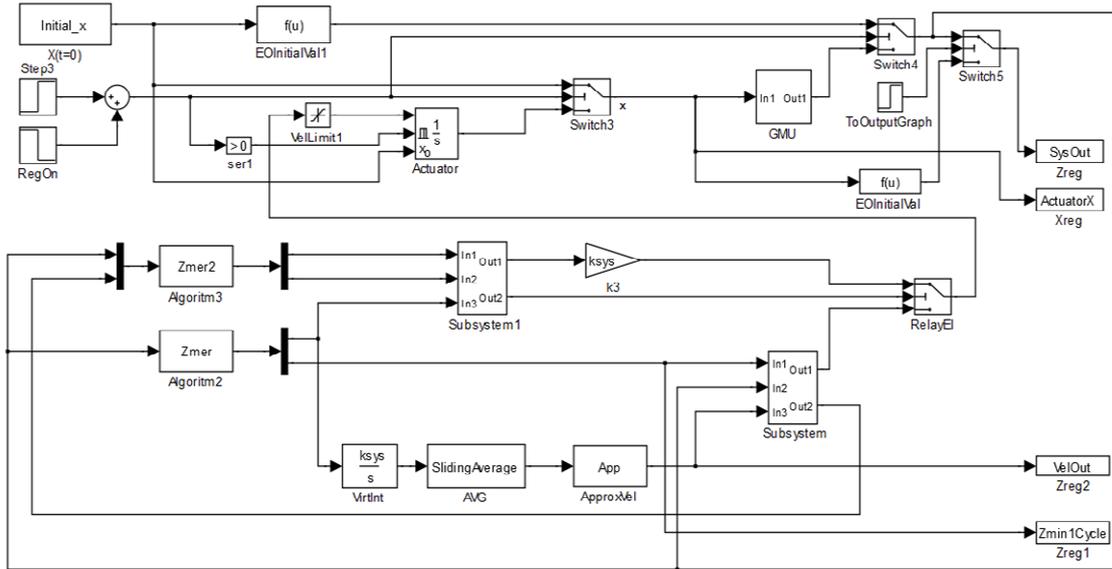


Рис. 5

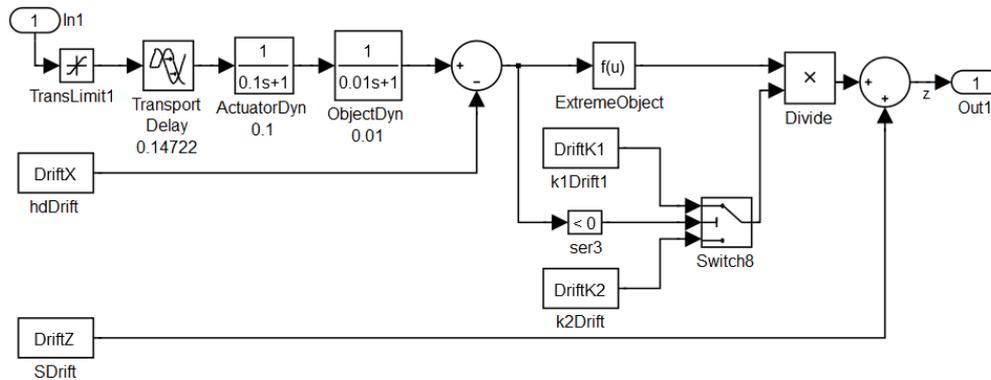


Рис. 6

которой представлена на рис. 6, где для задания дрейфа переменных h_{D0} , S_0 , k_1 , k_2 используются S-функции hdDrift, SDrift и т. д. Функции блока памяти БП2 и блока идентификации дрейфа БИД выполняет подпрограмма AVG, осуществляющая усреднение при помощи взвешенной локальной квадратичной регрессии. Блок ApproxVel задает значение скорости, которая поступает на интегратор Actuator исполнительного механизма. Экстремальный регулятор ЭР выполнен с помощью двух подпрограмм в виде S-функций: Algorithm2 задает обучающий поиск по методу запоминания экстремума на первом цикле загрузки, Algorithm3 выполняет функции экстремального регулятора ЭР на остальных циклах и блока памяти БП1 в режиме обучения. Для управления включением различных режимов используются подпрограммы Subsystem1 и Subsystem. Релейный элемент РЭ реализован с помощью блока Relay.

Результаты компьютерного моделирования динамики комбинированной системы приведены на рис. 7 и 8. На рис. 7, а показано изменение по-

ложения противовеса h_D , а на рис. 7, б – изменение СКЗ виброперемещений опорной стойки ЦПСА S на первом цикле работы. Экстремальный регулятор осуществляет непрерывный поиск с постоянной скоростью движения исполнительного механизма и значением зоны нечувствительности, равным $S_n = 10$ мкм. На рис. 8, а представлено изменение положения противовеса h_D , а на рис. 8, б изменение СКЗ виброперемещений опорной стойки ЦПСА S на втором цикле работы ЦПСА. Экстремальный регулятор включается на три поисковых движения в момент начала второго цикла ($t = 400$ с) и приблизительно в момент окончания загрузки в верхнюю помольную камеру ($t = 456$ с) поскольку выходное значение СКЗ виброперемещения S превысило значение соответствующее первому циклу загрузки с учетом зоны нечувствительности 5 мкм.

Следует заметить, что при изменении массы загрузки, характеристик измельчаемого материала или частых включений экстремального регулятора в

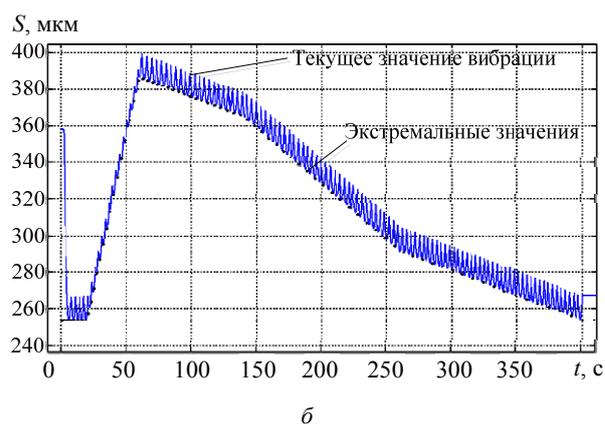
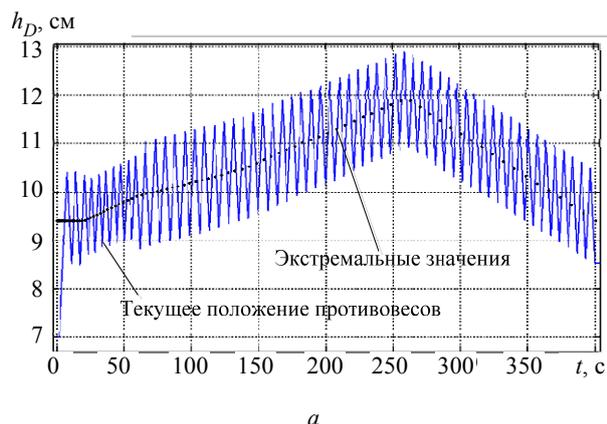


Рис. 7

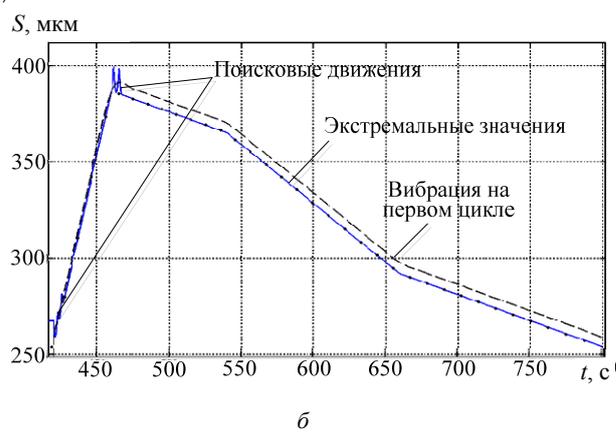
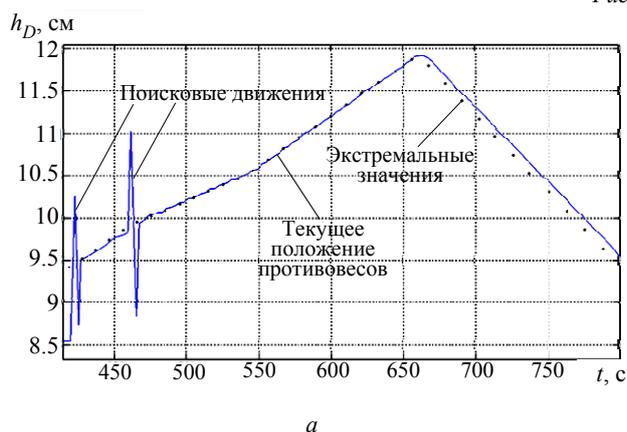


Рис. 8

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 исполь-

зована при следующей загрузке однотипного материала.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08009 «р_офи_м».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Севостьянов В. С., Уральский В. И., Синица Е. В. Центробежный помольно-смесительный агрегат // Вестн. Белгородского гос. технологического ун-та им. В. Г. Шухова. 2005. № 11. С. 215–217.
2. Пат. 114875 РФ, МПК В 02С 17/00. Помольно-смесительный агрегат с автоматической балансировкой / В. Г. Рубанов, В. С. Севостьянов, В. И. Уральский, А. А. Стативко, Д. А. Бушуев, С. А. Стативко; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В. Г. Шухова. № 2011144546/13; заявл. 02.11.11, опублик. 20.04.2012. Бюл. № 11. 2 с: ил.
3. Пат. 2494813 РФ, МПК В 02С 17/00. Помольно-смесительный агрегат с автоматической балансировкой / С. Н. Глаголев, В. Г. Рубанов, В. С. Севостьянов, В. И. Уральский, А. А. Стативко, С. А. Стативко, Д. А. Бушуев; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В. Г. Шухова. № 2012117656/13; заявл. 27.04.2012, опублик. 10.10.13. Бюл. № 28. 3 с.: ил.
4. Анисимов Д. Н. Итоги работ в области идентификации на кафедре управления и МЭИ (ТУ) / Д. Н. Анисимов, В. И. Гришин, О. С. Колосов и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2001. № 4. С. 22–29.
5. Yamamoto T. Historical developments in convergence analysis for Newton's and Newton-like methods // ELSEVIER J. of Computational and Appl. Math. 2000. № 124. С. 1–23.
6. Бушуев Д. А., Рубанов В. Г. Моделирование динамики экстремальной системы автоматической балансировки центробежного помольно-смесительного агрегата // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 11. С. 29–35.
7. Тюкин И. Ю., Терехов В. А. Адаптация в нелинейных динамических системах. М.: Изд-во ЛКИ, 2014. 384 с.

D. A. Bushuev, V. G. Rubanov

Belgorod State Technological University Named after V. G. Shukhov

COMBINED EXTREME SEEKING CONTROL SYSTEM OF AUTOMATIC VIBRATION SUPPRESSION OF THE CENTRIFUGAL GRINDING-MIXING UNIT

The study describes combined extremum-seeking control system of automatic vibration suppression of the centrifugal grinding-mixing unit, including extreme controller and program system with training. Virtual prototype of the unit is presented and mathematical description of the plant based on the data received while simulation using Adams software is shown. Simulation model of the combined system in the MatLab-Simulink software and simulation results are presented.

Vibration, automatic suppression, grinding-mixing unit, extremum-seeking controller, virtual prototype, combined system
