

УДК 681.58

В.Н. Круглов, Л.Г. Доросинский, Ю.В. Чирышев

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ СТРУИ В ПРЕДЕЛАХ ТЕЛЕВИЗИОННОГО КАДРА

V.N. Krouglov, L.G. Dorosinsky, Yu.V. Chiryshv

DEVELOPMENT OF SERVO SYSTEM MODEL TO CONTROL STREAM POSITION WITHIN VIDEO FRAME

Рассмотрена структурная схема модели следящей системы, приведены расчетные методики для определения параметров входных воздействий и следящего привода на базе электромеханического шагового двигателя. Изучена математическая модель следящей системы, даны результаты динамического имитационного моделирования с применением программного пакета Simulink Response Optimization.

СЛЕДЯЩАЯ СИСТЕМА; МОДЕЛЬ; ПЛАВИЛЬНАЯ ПЕЧЬ; ШАГОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ; ПИД-РЕГУЛЯТОР; ТЕЛЕВИЗИОННАЯ КАМЕРА; СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ; РОБАСТНОСТЬ.

The block diagram and mathematical model of servo-system is considered and calculation methods for determination of parameters of input actions and servo-system on the base of step-by-step motor are given. The dynamic simulation method is used for the system description. Optimal controller parameters were found using the Simulink Response Optimization toolbox.

SERVO-SYSTEM; MODEL; MELTING FURNACE; STEPPER MOTOR; PID CONTROLLER; TV CAMERA; COMPUTER VISION SYSTEM; ROBUSTNESS.

Анализ проблемы энергосбережения показывает, что один из наиболее эффективных путей ее решения заключается в сокращении потерь тепла через ограждающие конструкции зданий, сооружений и тепловых сетей. Этим объясняется интенсивное развитие производства теплоизоляционных материалов, в частности, минеральной ваты. При ее производстве одним из основных контролируемых параметров является дебит расплава, вытекающего из плавильного агрегата.

В настоящее время наиболее перспективными средствами измерения дебита расплава металлургических печей, работающих в непрерывном режиме технологического цик-

ла, являются приборы на основе систем технического зрения [1]. Особенность процесса истечения высокотемпературной струи расплава заключается в постоянном изменении ее местоположения. В зарубежных аналогах таких систем, например системе фирмы Gamma Meccanica SpA (Италия), проблема определения местоположения струи в пределах видеокadra решается за счет увеличения угла поля зрения объектива видеокамеры. Однако это приводит к ухудшению разрешающей способности оптической системы и, как следствие, к увеличению погрешности оценки диаметра струи и ее дебита [2]. Вот почему для сохранения необходимой разрешающей способности оптической си-

стемы необходимо включение в состав рассматриваемых приборов следящей системы, контролирующей местоположение струи, а оценка параметров такой системы является актуальной задачей.

В статье предлагается модель следящей системы, предназначенной для поддержания углового значения линии визирования телевизионной камеры, направленной на струю расплава, вытекающую из плавильной печи. Управлению подлежит угол поворота линии визирования видеокамеры, другими словами, система должна управлять углом поворота вала двигателя, связанного с видеокамерой.

В процессе проектирования следящей системы необходимо учитывать широкий круг технических требований, влияющих в конечном счете на единый критерий качества системы. К названным требованиям следует отнести:

динамические характеристики, определяющие ошибки в системе управления при различных режимах работы;

надежность работы системы, устойчивость к влиянию внешних воздействий;

характер эксплуатации системы;

допустимое потребление энергии и т. д.

Для исследования различных характеристик системы должна использоваться компьютерная модель, т. к. в процессе проектирования возникнет потребность в проведении числовых экспериментов в условиях, приближенных к реальным. В результате того что модель окажется в тех же условиях и будет подвергнута тем же внешним воздействиям, при которых будет работать реальная система, мы сможем получить количественные оценки поведения системы.

Адекватным подходом к исследованию следящей системы, находящейся под влиянием случайных воздействий, является применение статистических методов, которые дают возможность учесть случайный характер воздействия.

Для проектируемой следящей системы критерием оптимального управления будем считать такой режим, когда установившееся значение дисперсии ошибки минимально.

Характер входного воздействия проектируемой системы со временем меняется

и в общем случае представляет собой нестационарный случайный процесс. Есть интервалы времени, когда струя течет «спокойно», при этом можно достоверно определить статистические характеристики этого случайного процесса. Когда прочищается выпускное отверстие плавильной печи (летка), входное воздействие системы представляет собой случайный процесс с параметрами, изменяющимися во времени.

«Спокойное» поведение струи не представляет практического интереса, поскольку дисперсия случайного процесса является очень малой величиной. Струя расплава постоянно находится в кадре. Следить за струей нужно в те периоды времени, когда струя отклоняется от центра кадра или движется за пределы видимости кадра, например, при расширении летки. Поведение струи в такие моменты представляет собой нестационарный процесс.

При использовании для целей динамического синтеза методов оптимальной фильтрации необходимо априорное знание статистических характеристик полезного сигнала и помехи. Построение простой, достаточно достоверной модели входного воздействия в данном случае сделать не удастся, т. к. анализ свойств нестационарных случайных процессов представляет собой сложную задачу. Переход к структуре, содержащей устройства адаптации, лишь усложнит систему. Вот почему представляется целесообразным построение робастной системы управления, которая обеспечит требуемое качество слежения при изменении статистических характеристик входных воздействий в широких пределах.

В качестве исполнительного элемента в следящих системах широкое распространение получили шаговые двигатели (ШД). Связано это с тем, что они обладают некоторыми свойствами, которые делают их исключительно удобными для применения:

угол поворота ротора определяется числом импульсов, поданных на двигатель;

точность составляет 3–5 % от величины шага, причем ошибка не накапливается от шага к шагу;

старт/остановка/реверсирование осуществляются практически безынерционно;

надежность определяется только сроком службы подшипников.

Применение шаговых приводов обусловлено еще и тем обстоятельством, что они естественным образом сочетаются с цифровыми управляющими машинами, программными устройствами и микропроцессорами. Именно по этим соображениям использование шагового двигателя в качестве исполнительного устройства для рассматриваемой системы является наиболее предпочтительным.

В общем случае поведение m -фазного шагового двигателя описывается системой из $m + 1$ уравнений, причем m уравнений являются уравнениями электрического равновесия и одно – уравнением движения ротора [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} R \cdot i_m(t) + L \frac{di_m(t)}{dt} + E_m = u_m(t) \\ J \frac{d^2\alpha(t)}{dt^2} + K \frac{d\alpha(t)}{dt} + F \frac{d\alpha(t)}{dt} + M_H(t) = M(t), \end{array} \right. \quad (1)$$

где $u_m(t)$ – мгновенное значение напряжения на фазе статора; R – сопротивление статора; $i_m(t)$ – мгновенное значение тока в фазе; L – индуктивность фазы; E_m – наведенная ЭДС в фазной обмотке; α – угол поворота ротора; J – приведенный момент инерции привода; K – коэффициент демпфирования силами вязкого трения; F – момент сухого трения; $M_H(t)$ – общий момент нагрузки; $M(t)$ – мгновенное значение синхронизирующего момента шагового двигателя.

Дальнейшее упрощение заключается в линеаризации уравнений, переходу к операторной форме и записи передаточной функции шагового двигателя при отработке одного шага в виде $W_{\text{оу}}(p) = \frac{\Theta_0}{\Theta_i}$, где p – оператор Лапласа; Θ_0 – преобразование Лапласа действительного углового положения; Θ_i – преобразование Лапласа требуемого значения угла [3, 4].

Переходный процесс ротора шагового двигателя при каждом шаге учитывается введением непрерывного звена. Передаточ-

ная функция такого звена при единичном ступенчатом воздействии может быть определена следующим образом:

$$W_H(p) = \frac{\Theta_0}{\Theta_i} = \frac{1}{T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + 1}, \quad (2)$$

$$\text{где } T = \frac{1}{\omega_0} = \sqrt{\frac{J}{P \cdot M_m}};$$

$\xi = \frac{9,81 \cdot 10^{-5} \cdot M_m}{P \cdot I^2 \cdot R} \omega_0 \cdot k_{\text{ш}}$; ω_0 – собственная частота малых колебаний ротора около положения равновесия; P – число пар полюсов двигателя; M_m – максимальный статический синхронизирующий момент двигателя; J – момент инерции привода; $k_{\text{ш}}$ – коэффициент, учитывающий демпфирование обмоток ШД (изменяется в пределах от 1 до 2); R – сопротивление фазы статора.

Электромагнитные переходные процессы могут быть учтены звеном чистого запаздывания $e^{-\tau_{\text{дв}} p}$. Передаточная функция при этом принимает вид:

$$W_H(p) = \frac{e^{-\tau_{\text{дв}} p}}{T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + 1}, \quad (3)$$

где $\tau_{\text{дв}}$ – постоянная времени, определяемая отношением индуктивности и активного сопротивления цепи обмоток управления.

Перед непрерывным звеном должен быть включен формирующий элемент. В эквивалентных схемах используется формирующий элемент типа фиксатора уровня, что соответствует особенности двигателя затормаживаться после каждого шага. Передаточная функция фиксатора имеет вид:

$$\Phi(p) = \frac{1 - e^{-T_0 p}}{p}. \quad (4)$$

Таким образом, эквивалентную схему можно представить в виде последовательного соединения звеньев $\Phi(p)$ и $W_H(p)$.

Очевидно, реакция модели на любой входной сигнал не должна отличаться от реакции шагового двигателя на этот сигнал, т. к. только при этом условии возможна замена шагового двигателя эквивалентной схемой в общей структурной схеме следящей системы. Реакция θ_0 на шаговую функцию θ_i приведена на рис. 1.

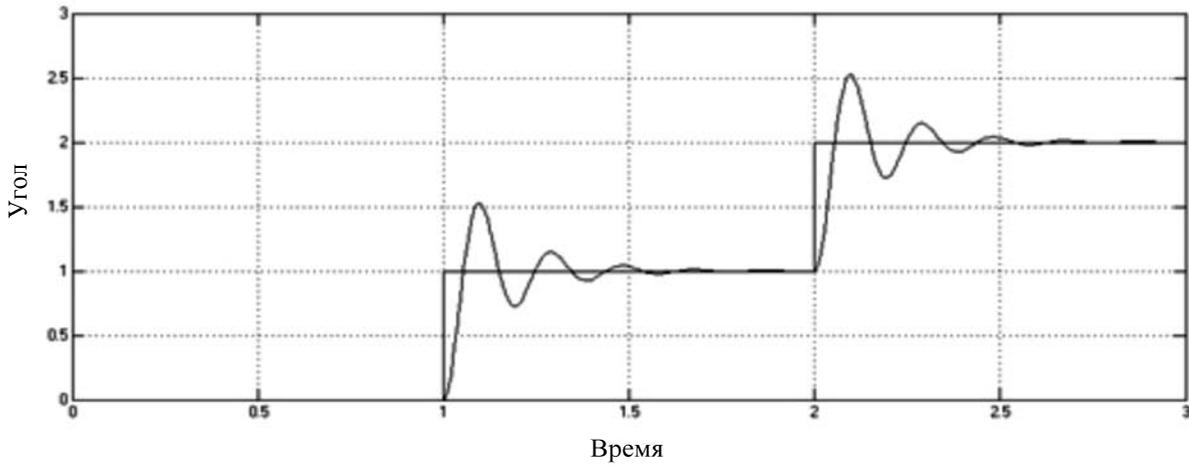


Рис. 1. Перемещения ротора

Перемещение ротора является колебательным затухающим процессом, амплитуда и время затухания которого зависят от параметров конкретного привода и нагрузки.

Цель синтеза робастной системы заключается в том, чтобы выходная переменная системы за минимальное время и с требуемой точностью воспроизводила все изменения входного сигнала. Любая практическая система содержит элементы емкостного и индуктивного типа, накапливающие энергию. Именно эти элементы в сочетании с элементами, рассеивающими энергию, обуславливают динамику системы слежения. Поэтому цель управления сформулируем следующим образом: амплитудную характеристику системы надо стремиться сделать как можно ближе к единице в как можно большем интервале частот.

В качестве устройства управления используется ПИД-регулятор с передаточной функцией [5]:

$$W_{\text{пид}}(p) = K_{\text{п}} + \frac{K_{\text{и}}}{p} + K_{\text{д}}p. \quad (5)$$

Его структурная схема приведена на рис. 2.

Во временной области выходная переменная регулятора $u(t)$ и его входная переменная $e(t)$ связаны уравнением:

$$u(t) = K_{\text{п}}e(t) + K_{\text{и}} \int e(t)dt + K_{\text{д}} \frac{de(t)}{dt}. \quad (6)$$

Выбор трех коэффициентов ПИД-регулятора по сути и есть задача отыскания такого устройства управления, при котором обеспечивались бы желаемые показатели качества системы.

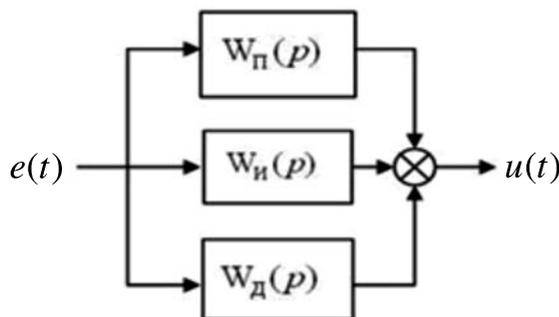


Рис. 2. Структурная схема ПИД-регулятора

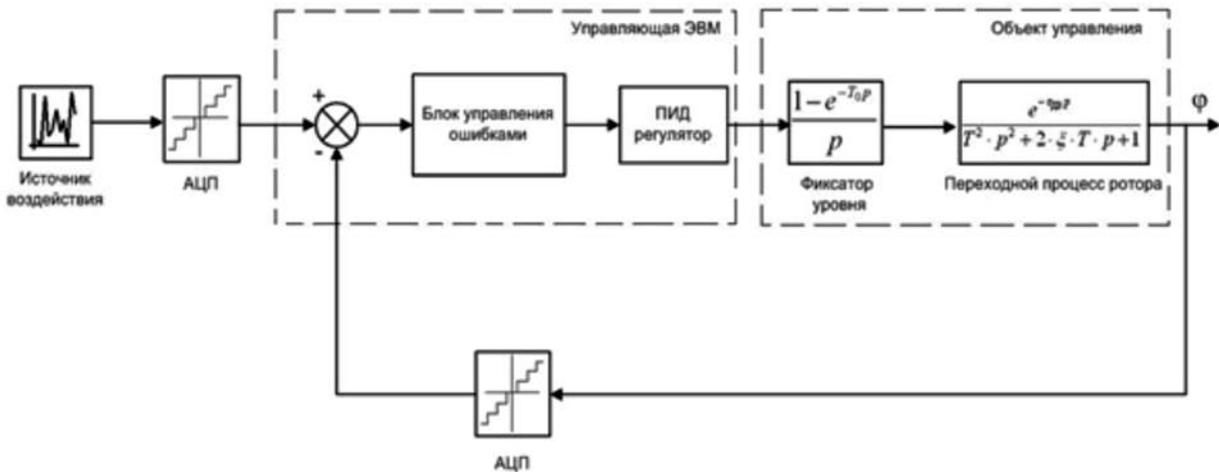


Рис. 3. Структурная схема приближенной модели системы управления:
 ϕ – текущее значение угла поворота исполнительного вала

Система управления цифровым следящим приводом на основе электромеханического шагового двигателя может быть описана структурной схемой, приведенной на рис. 3. Данная модель представляет собой описание каскадной одноконтурной следящей системы автоматического управления позиционированием углового положения видеокамеры. Соответствующая ей модель, построенная из блоков пакета Simulink, показана на рис. 4. В фиксированные моменты времени, следующие с периодом дискретизации T_d , управляющая программа

сравнивает текущее положение струи расплава, приведенное к угловому положению вала двигателя, с угловым положением видеокамеры.

Значение T_d определяется аналого-цифровыми преобразователями Quantizer и Quantizer1.

Если струя находится в центре кадра или ее отклонение от середины не превышает определенного порога (струя находится в зоне нечувствительности), блок управления ошибками (Control of errors) игнорирует такое незначительное отклоне-

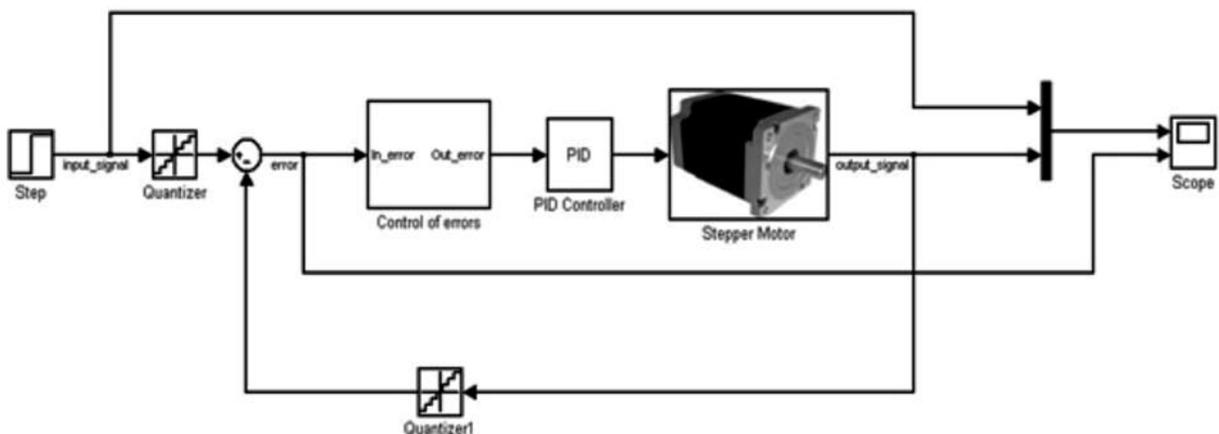


Рис. 4. Модель системы управления:

Step – источник ступенчатого воздействия; Quantizer, Quantizer1 – аналого-цифровые преобразователи; Control of errors – подсистема управления ошибками; PID Controller – дискретный ПИД-регулятор; Stepper Motor – подсистема шагового привода; Scope – осциллограф

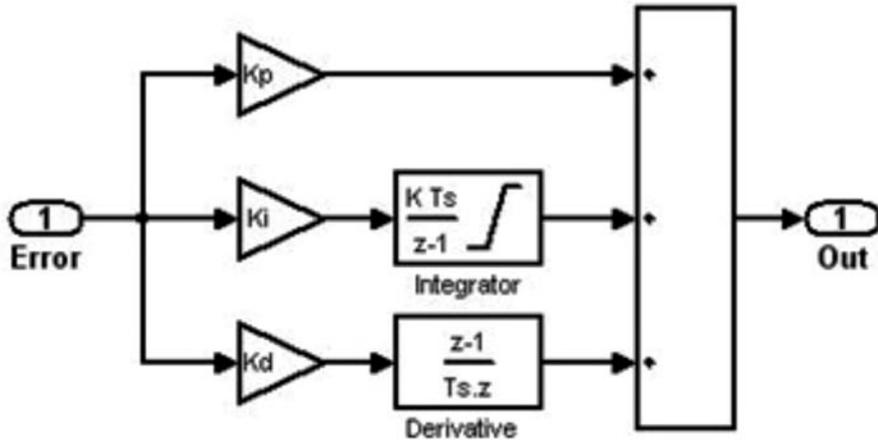


Рис. 5. Структура цифрового ПИД-регулятора:
Integrator – блок интегрирования; Derivative – блок дифференцирования;
Kp, Ki, Kd – коэффициенты регулятора

ние и подает на регулятор (PID Controller) нулевую ошибку. При этом на шаговый двигатель не подается управляющего воздействия, он не меняет своего положения. Если программа определяет, что струя находится вне зоны нечувствительности, текущее значение ошибки попадет на вход регулятора, на выходе которого формируется сигнал управления шаговым двигателем для минимизации ошибки отклонения.

Структура цифрового ПИД-регулятора, показанная на рис. 5, отличается от структуры аналогового (см. рис. 2) лишь тем, что операторы дифференцирования и интегрирования в классическом уравнении ПИД-регулятора (6) заменены конечными разностями и конечными суммами. В результате получаем модель управляемого объекта и структуру системы управления. Далее необходимо получить линеаризован-

ную модель, которая будет использоваться для настройки системы управления. Для этого используем пакет Simulink Control Design. В нем выбираем те объекты, которые необходимо настроить. Так как устройством управления данной системы является ПИД-регулятор, он и будет выбран. Затем нужно задать частотные и временные характеристики – требования к системе.

Основным показателем качества работы системы является обеспечение обработки входного воздействия с минимальной ошибкой. Для того чтобы заданное воздействие воспроизводилось с ошибкой не более e_{\max}^0 , ЛАХ проектируемой системы не должна заходить в запретную область, ограниченную двумя прямыми с наклонами -20 дБ и -40 дБ [6, 8]. Для определения требований к низкочастотной части ЛАХ необходимо знать максимальное по модулю

Исходные данные

Максимальная скорость входного воздействия, град/с	1,6
Максимальное ускорение входного воздействия град/с ²	0,4
Максимально допустимая ошибка слежения e_{\max}^0 , град	3
Период дискретизации T_d , с	0,3

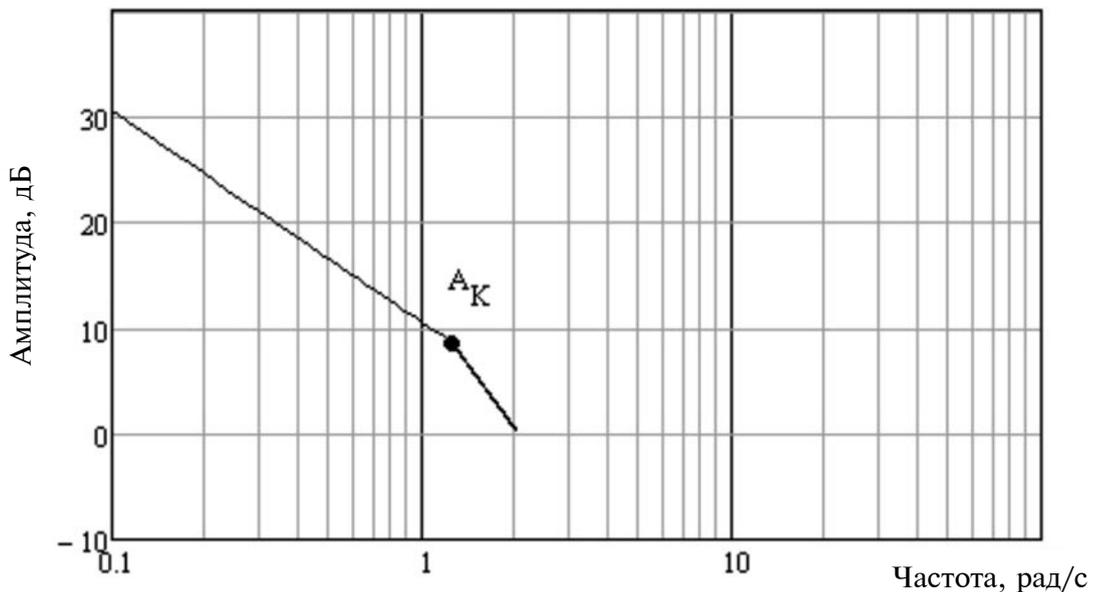


Рис. 6. Контрольные точки для ЛАХ из условия точности воспроизведения входного сигнала

значение скорости \dot{g}_{\max} , максимальное по модулю значение ускорения \ddot{g}_{\max} входного сигнала $g(t)$ и максимально допустимую ошибку слежения e_{\max}^0 .

Детальный анализ динамических характеристик струи расплава проводился с помощью базы видеоизображений, содержащей более 3500 кадров. В результате проделанной работы были определены скорость и ускорение перемещения струи в горизонтальном направлении. Исходя из условий технологического процесса, дальности расположения видеокамеры от струи расплава, угловых размеров поля зрения объектива задается максимально допустимая ошибка слежения, равная трем градусам. Полученные данные сведены в таблицу.

В соответствии с [6, 7] построена запретная область ЛАХ системы, удовлетворяющей требованию, чтобы максимальная ошибка не превышала заданного значения $e_{\max}^0 = 3$ град, приведенная на рис. 6.

Кроме этого введем дополнительные ограничения:

время переходного процесса при отработке ступенчатого воздействия не более 1 с;
перерегулирование – не более 15 %.

Для нахождения оптимальных параметров ПИД-регулятора использовался пакет численной оптимизации Simulink Response Optimization с предварительно заданными ограничениями на ступенчатый входной сигнал и низкочастотную часть ЛАХ. Достоинства пакета заключаются в том, что оптимизация параметров осуществляется в автоматическом режиме. В результате проведенного моделирования определены оптимальные параметры ПИД-регулятора, которые имеют следующие численные значения:

$$K_p = 0,87, \quad K_I = 4,48, \quad K_D = 0,001.$$

В результате проделанной работы получены следующие результаты:

разработана математическая модель системы слежения на основе электромеханического шагового двигателя;

выполнен анализ динамических характеристик процесса истечения струи расплава на базе предприятия ОАО «АКСИ» (г. Челябинск), в результате которого определена максимально допустимая ошибка слежения, не превышающая трех градусов углового отклонения линии ви-

зирования видеокамеры от местоположения струи расплава в горизонтальном направлении;

для выбранного критерия оптимизации

следящей системы путем математического моделирования определены оптимальные коэффициенты ПИД-регулятора следящей системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sirok B., Blagojevich B. Mineral wool. WoodHead Publishing limited, Cambridge, England, 2008. P. 184.

2. Круглов В.Н. Способ определения производительности плавильного агрегата // Патент РФ № 2469962. Приоритет 06.07.2011.

3. Гумен В.Ф., Калининская Т.В. Следящий шаговый электропривод. Л.: ЛО «Энергия», 1980. 168 с.

4. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987. 200 с.

5. Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. СПб.: Невский Диалект, 2001. 557 с.

6. Бесековский В.А., Изранцев В.В. Системы автоматического управления и микроЭВМ. М.: Наука. Гл. ред. Физматлит, 1987. 320 с.

7. Бесековский В.А. Цифровые автоматические системы. М.: Наука. Гл. ред. Физматлит, 1976. 576 с.

8. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника». М.: Высш. шк., 1990. 335 с.

REFERENCES

1. Sirok B., Blagojevich B. *Mineral wool*. WoodHead Publishing limited, Cambridge, England, 2008, P. 184.

2. Kruglov V.N. Sposob opredeleniya proizvoditel'nosti plavil'nogo agregata. *Patent RF, No. 2469962 [Patent for the method of determining the performance of the melting unit]*, Prioritet 06.07.2011. (rus)

3. Gumen V.F., Kalininskaya T.V. *Sledyashchiy shagovyy elektroprivod [Tracking stepper actuator]*, Leningrad: Energiya Publ., 1980, 168 p. (rus)

4. Kenio T. *Shagovyye dvigateli i ikh mikroprotsessornyye sistemy upravleniya*. Moscow:

Energoatomizdat Publ., 1987, 200 p. (rus)

5. Olsson G., Piani D. *Tsifrovyye sistemy avtomatizatsii i upravleniya*. St. Petersburg: Nevskiy Dialekt Publ., 2001, 557 p. (rus)

6. Besekerskiy V.A., Izrantsev V.V. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya i mikroEVM*. Moscow: Nauka Publ. Gl. red. Fizmatlit, 1987, 320 p. (rus)

7. Besekerskiy V.A. *Tsifrovyye avtomaticheskiye sistemy*. Moscow: Nauka Publ. Gl. red. Fizmatlit, 1976, 576 p. (rus)

8. Kononov G.F. *Radioavtomatika*. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1990, 335 p. (rus)

КРУГЛОВ Василий Николаевич — доцент кафедры информационных технологий Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, кандидат технических наук.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

E-mail: v.krouglov@mail.ru

KROUGLOV, Vasilii N. *Ural Federal University named after first president of Russia B.N. Yeltsin.*

620002, Mira Str. 19, Ekaterinburg, Russia.

E-mail: v.krouglov@mail.ru

ДОРОСИНСКИЙ Леонид Григорьевич — профессор кафедры информационных технологий Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, доктор технических наук.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

E-mail: l.dorosinsky@mail.ru

DOROSINSKY, Leonid G. *Ural Federal University named after first president of Russia B.N. Yeltsin.*

620002, Mira Str. 19, Ekaterinburg, Russia.

E-mail: l.dorosinsky@mail.ru



ЧИРЫШЕВ Юрий Владимирович – аспирант кафедры информационных технологий Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

E-mail: iurii.chiryshev@mail.ru

CHIRYSHEV, Yuri V. *Ural Federal University named after first president of Russia B.N. Yeltsin.*

620002, Mira Str. 19, Ekaterinburg, Russia.

E-mail: iurii.chiryshev@mail.ru