

Моделирование автоматической системы управления непрерывным дозированием сыпучих материалов

С. Р. Шакиров, А. Г. Квашнин, А. В. Писарев

Институт вычислительных технологий СО РАН,
Новосибирск, Россия
pisarev@tecon.ru

Аннотация Разработаны математические модели технологического оборудования, используемого для непрерывного дозирования сыпучих материалов. Выполнен синтез автоматической системы управления непрерывным дозированием сыпучих материалов. Представлены результаты её моделирования.

Ключевые слова: непрерывное дозирование сыпучих материалов, транспортное запаздывание, автоматическая система управления, установка переработки органических отходов, математическое моделирование

Введение

В ИВТ СО РАН ведутся работы по автоматизации опытно-промышленного образца установки для переработки органических отходов [1]. Установка производит тепловую энергию и энергоносители (твердые – биоуголь, жидкие – бионефть и газообразные – синтезгаз), например, из биомассы с различными химическими составом, физическими свойствами. Оборудование может перерабатывать «сложные» виды отходов – высоковлажные и высокозольные. Для этого оборудование комплекса переработки органических отходов может комплектоваться блоком каталитической сушки сырья, работа которого основана на применении уникальных отечественных химических катализаторов и распушителей, разработанных специально для таких специфических, массовых и экологически опасных отходов сельскохозяйственного производства, как птичий помет. Перемещение материала между агрегатами, осуществляющими предварительную подготовку отходов к переработке, осуществляется ленточными транспортерами. Дозирование количества материала, подаваемого для предварительной подготовки отходов к переработке, осуществляется изменением частоты вращения дозирующего органа бункера материала (лопастного питателя). Изменение уровня материала в бункере, его физических характеристик, в частности гранулометрического состава, приводит к изменению динамических характеристик системы непрерывного дозирования материала, что требует применения алгоритмов для их идентификации в режиме реального времени. Последующее

перемещение материала осуществляется ленточным питателем. Ленточный питатель обладает транспортным запаздыванием. Скорость перемещения ленты плавно изменяется в зависимости от частоты вращения дозирующего органа лопастного питателя, что требует определения величины транспортного запаздывания в режиме реального времени, т.к. весоизмеритель установлен за ленточным питателем (см. рис. 2). Для обеспечения работоспособности и улучшения качества переходных процессов в системе управления непрерывным дозированием материалов необходима его компенсация [2].

Математическая модель системы непрерывного дозирования сыпучего материала

В качестве дозатора используется лопастной питатель, установленный под бункером с сыпучим материалом. Выдача материала обеспечивается за счет поочередного заполнения и разгрузки отсеков питателя в процессе вращения ротора, регулирование производительности осуществляется путем плавного изменения скорости его вращения, что обеспечивается электроприводом с частотно-регулируемым преобразователем (ЧРП). При осуществлении дозирования передаточная функция по каналу «частота вращения ротора лопастного питателя - расход материала» имеет вид [3]:

$$W_{pit}(s) = \frac{G_1}{\omega_{lp}} = k_{lp} e^{-\tau_{lp}s}, \quad (1)$$

где

G_1 , кг/с - расход материала;
 ω_{lp} , рад/с - частота вращения лопастного питателя;
 k_{lp} , кг - коэффициент усиления передаточной функции по каналу «частота вращения ротора лопастного питателя - расход материала»;
 τ_{lp} , с - постоянная времени транспортного запаздывания передаточной функции по каналу «частота вращения ротора лопастного питателя - расход материала» (для ленточного транспортера);
 s - оператор Лапласа.

Установившееся значение расхода для лопастного питателя определяется формулой [3]:

$$G_{lp} = K_{lp} [\pi(r_{lp}^2 - r_0^2) - n_{lp}(r_{lp} - r_0)b_{lp}] \frac{\delta_{mat} \gamma_{mat}}{2\pi} \omega_{lp}, \quad (2)$$

где

G_{lp} , кг/с - расход материала для лопастного питателя;
 r_{lp} , м - радиус лопастного питателя (см. рис. 1);
 r_0 , м - радиус выходного отверстия лопастного питателя (см. рис. 1);
 K_{lp} - коэффициент заполнения лопастного питателя материалом ($K_{lp} = 0,8 \div 1$);

n_{lp} , шт - количество лопастей лопастного питателя;
 δ_{mat} , м - диаметр частиц материала;
 b_{lp} , м - высота лопастного питателя (см. рис. 1);
 γ_{mat} , кг/м³ - насыпная плотность материала;
 ω_{lp} , рад/с - частота вращения лопастного питателя (см. рис. 1).

Экспериментально определено, что $K_{lp} = 0,9$.

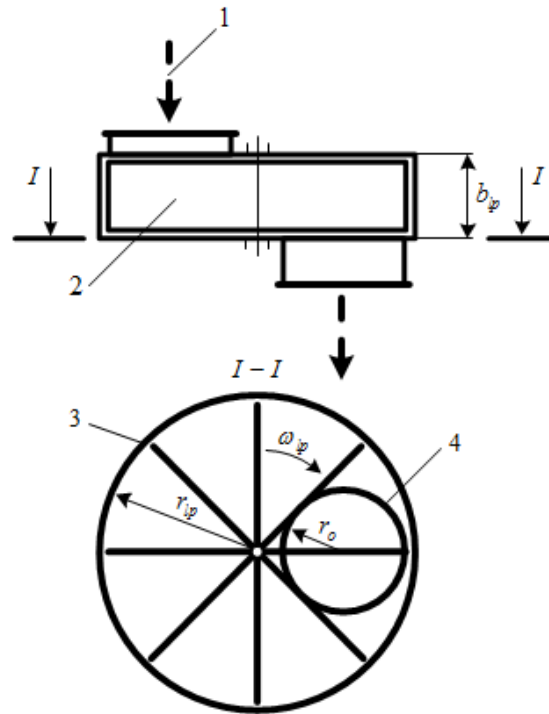


Рисунок 1. Схема лопастного питателя. Здесь: 1 – направление перемещения материала; 2 – корпус; 3 – ротор; 4 – выходное отверстие.

В формуле (1) k_{lp} определяется по формуле:

$$k_{lp} = \frac{G_{lp}^{max}}{\omega_{lp}^{max}}, \quad (3)$$

где

G_{lp}^{max} , кг/с – максимальный расход материала для лопастного питателя;
 ω_{lp}^{max} , рад/с – максимальная частота вращения лопастного питателя.

Заменив в формуле (2) G_{lp} на G_{lp}^{max} и ω_{lp} на ω_{lp}^{max} , подставив в формулу (2) формулу (3) получим:

$$k_{lp} = K_{lp} [\pi(r_{lp}^2 - r_0^2) - n_{lp}(r_{lp} - r_0)b_{lp}] \frac{\delta_{mat}\gamma_{mat}}{2\pi}. \quad (4)$$

Постоянная времени запаздывания для ленточного транспортера τ_{lt} в формуле (1) определяется из соотношения [3]:

$$\tau_{lt} = \frac{L}{v_{lt}}, \quad (5)$$

где

L , м – длина ленточного транспортера от точки подачи до места сброса материала с ленты (см. рис. 2);

v_{lt} , м/с – линейная скорость перемещения ленты транспортера.

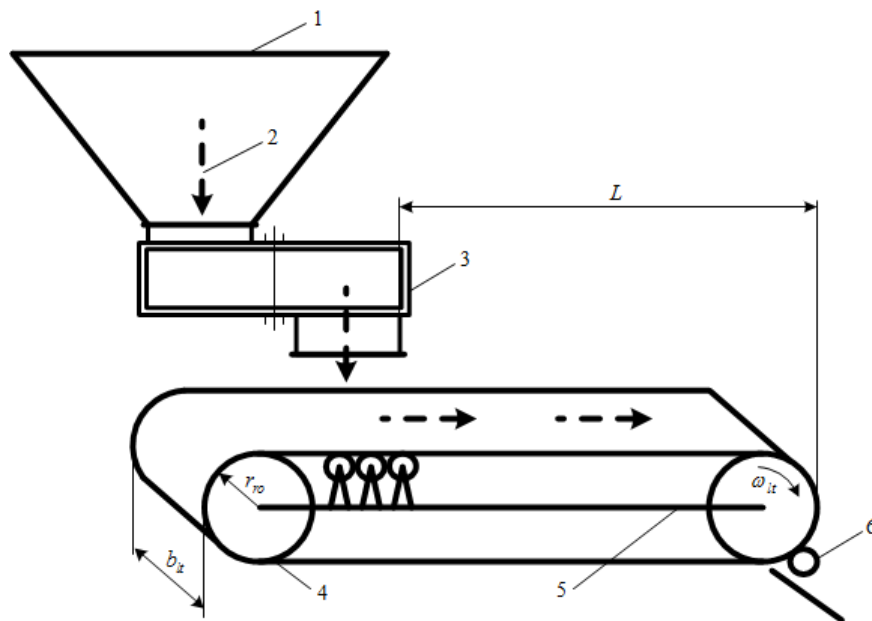


Рисунок 2. Схема дозирования и перемещения сыпучего материала. Здесь: 1 – воронка бункера сыпучего материала; 2 – направление перемещения материала; 3 – лопастной питатель; 4 – опорный ролик ленточного транспортера; 5 – рама ленточного транспортера; 6 – очистительное устройство.

Линейная скорость перемещения ленты v_{lt} определяется по формуле:

$$v_{lt} = \omega_{ro}r_{ro}, \quad (6)$$

где

ω_{ro} , 1/с – угловая частота вращения роликовых опор ленточного транспортера;
 r_{ro} , м – радиус роликовых опор ленточного транспортера (см. рис.2).

Расход материала для ленточного транспортера определяется по формуле [3]:

$$G_{lt} = b_{lt} h_{mat} \gamma_{mat} v_{lt}, \tag{7}$$

где

b_{lt} , м – ширина ленты транспортера (см. рис.2);
 h_{mat} , м – высота слоя материала на ленте;
 γ_{mat} , кг/м³ – насыпная плотность материала.

Т.к. транспортное запаздывание τ_{lt} зависит от скорости вращения электродвигателя, который приводит во вращение ленту транспортера, то выполнен расчет его текущего значения для реализации алгоритма компенсации по формуле (5).

Лента транспортера и ротор лопастного питателя через редукторы приводятся в движение электродвигателями. Электроприводы ленты транспортера и ротора лопастного питателя, обладают некоторой инерционностью. В работе не учитываются люфты в редукторах, муфтах и других элементах электроприводов. На основании этого элементы каждого из электроприводов могут быть представлены звеньями с передаточными функциями [4]:

$$W_m^{lt/lp}(s) = \frac{\omega_{ed}^{lt/lp}}{\omega_{ed}^{CRP}} = \frac{k_m^{lt/lp}}{T_m^{lt/lp} s + 1}, \tag{8}$$

где

$k_m^{lt/lp}$, (рад/с)/(рад/с) – коэффициент передачи редуктора привода роликовой опоры ленточного транспортера/лопастного питателя;
 ω_{ed}^{CRP} , рад/с – выход ЧРП электропривода роликовой опоры ленточного транспортера/ротора лопастного питателя;
 $\omega_{ed}^{lt/lp}$, рад/с – частота вращения ротора электродвигателя механической системы привода роликовой опоры ленточного транспортера/лопастного питателя;
 $T_m^{lt/lp}$, с – обобщенная постоянная времени элементов механической системы привода роликовой опоры ленточного транспортера/ротора лопастного питателя.

Принимаем $T_m^{lt} = T_m^{lp} = 0,3с$ [4].

ЧРП электропривода ленточного транспортера и лопастного питателя представлен передаточной функцией [4]:

$$W_{CRP}^{lt/lp}(s) = \frac{\omega_{ed}^{CRP}}{\omega_{zad}^{CRP}} = \frac{1}{T_{CRP}^{lt/lp} s + 1}, \tag{9}$$

где

$T_{CRP}^{lt/lp}$, с – постоянная времени ЧРП привода роликовой опоры ленточного транспортера/ротора лопастного питателя;

$\omega_{zad}^{CRP}{}_{lt/lp}$, рад/с – заданная частота вращения ЧРП электропривода роликовой опоры ленточного транспортера/ротора лопастного питателя.

Принимаем типовое значение времени разгона для частотных преобразователей электродвигателей механической системы привода роликовой опоры ленточного транспортера и лопастного питателя: $T_{CRP}^{lt} = T_{CRP}^{lp} = 2с$ [4].

Частота вращения опорного ролика ленточного транспортера и ротора лопастного питателя с учетом возмущения определяется по формуле:

$$\omega_{po}^{lt/lp} = \omega_{ed}^{lt/lp} - \omega_{po}^M{}_{lt/lp},$$

где

$\omega_{po}^M{}_{lt/lp}$, рад/с – возмущения по частоте вращения опорного ролика ленточного транспортера/ротора лопастного питателя, возникающие из-за увеличения момента на валу электродвигателя привода ленточного транспортера (принимается, что проскальзывание ленты транспортера отсутствует)/ротора лопастного питателя.

Коэффициент $k_m^{lt/lp}$ в формуле (8) определяется соотношением:

$$k_m^{lt/lp} = \frac{\omega_{lt/lp}^{max}}{\omega_{ed}^{max}{}_{lt/lp}},$$

где

$\omega_{ed}^{max}{}_{lt/lp}$, рад/с – максимальная частота вращения электродвигателя механической системы привода ленточного транспортера/лопастного питателя;

$\omega_{lt/lp}^{max}$, рад/с – максимальная частота вращения опорного ролика ленточного транспортера/ротора лопастного питателя.

Для редуктора лопастного питателя k_m^{lp} в формуле (8) составляет 0,01, для редуктора ленточного транспортера k_m^{lt} составляет 0,35.

Весоизмеритель считаем аperiodическим звеном второго порядка [4]:

$$W_{ves}(s) = \frac{G'_1}{G_1} = \frac{1}{a_1 s^2 + a_2 s + 1}, \quad (10)$$

где

$a_1 = 0,09с^2$, $a_2 = 0,6с$ – коэффициенты передаточной функции; они зависят от параметров сглаживающего фильтра в составе конвейерных весов [4];

G_1 , кг/с – расход материала;

G'_1 , кг/с – расход материала, определенный весоизмерителем.

Скорость перемещения ленточного питателя и, соответственно, частота вращения электродвигателя, приводящего его в движение, определяется производительностью лопастного питателя. Следовательно, должно выполняться равенство:

$$G_{lt} = G_{lp}. \quad (11)$$

Заменяв в формуле (3) G_{lp}^{max} на G_{lp} и ω_{lp}^{max} на ω_{lp} получим соотношение:

$$G_{lp} = k_{lp}\omega_{lp}. \quad (12)$$

Выразим из уравнения (7) величину v_{lt} :

$$v_{lt} = \frac{G_{lt}}{b_{lt}h_{mat}\gamma_{mat}}. \quad (13)$$

С учетом равенства (11), подставив уравнение (12) в уравнение (13), получим:

$$v_{lt} = k_{lt}k_{lp}\omega_{lp}. \quad (14)$$

где

$$k_{lt} = \frac{1}{b_{lt}h_{mat}\gamma_{mat}}. \quad (15)$$

С учетом формулы (6) из формулы (14) получим заданную угловую частоту вращения опорных роликов ленточного транспортера:

$$\omega_{ro} = \frac{k_{lt}k_{lp}}{r_{ro}}\omega_{lp}.$$

В уравнения (4) и (13) входит значение насыпной плотности материала γ_{mat} , т.к. она зависит от вида подаваемого материала или их смеси, размера его частиц и неконтролируемо изменяется в процессе работы установки, то происходит и неконтролируемое изменение k_{lp} и k_{lt} . Например, для частиц органического вещества помета насыпная плотность составляет $\gamma_{mat}^{org} = 1500\text{кг/м}^3$ [5], а для частиц древесного угля $\gamma_{mat}^{ugol} = 200\text{кг/м}^3$ [5]. Экспериментально определено, что диаметр частиц органического вещества помета δ_{mat}^{org} составляет от 0,001м до 0,01м и диаметр частиц древесного угля δ_{mat}^{ugol} составляет от 0,003м до 0,03м.

Высота слоя материала на ленте h_{mat} зависит от производительности лопастного питателя. Высоту слоя материала на ленте h_{mat} измерить с достаточной для дальнейших расчетов точностью проблематично. Поэтому считаем, что изменение h_{mat} происходит неконтролируемо. Экспериментально определено, что h_{mat} изменяется в диапазоне от 0,01м до 0,1м в зависимости от производительности лопастного питателя.

Для вычисления числового значения k_{lp} , определим конструктивные характеристики лопастного питателя [3]:

- радиус лопастного питателя $r_{lp} = 0,5$ м;
- радиус выходного отверстия лопастного питателя $r_0 = 0,2$ м;
- количество лопастей лопастного питателя $n_{lp} = 8$ шт;
- высота лопастного питателя $b_{lp} = 0,5$ м.

Для определения числового значения k_{lt} , определим конструктивные характеристики ленточного транспортера [3]:

- длина ленточного транспортёра от точки подачи до места сброса материала с ленты $L = 30$ м;
- ширина ленты транспортёра $b_{lt} = 0,5$ м ;
- радиус роликовых опор ленточного транспортёра $r_{ro} = 0,1$ м .

Определим диапазон изменения параметров передаточных функций (3) и (15): k_{lp} и k_{lt} соответственно, для частиц органического вещества и древесного угля:

$$68,3 = k_{lp}^{org-min} \leq k_{lp}^{org} \leq k_{lp}^{org-max} = 70,6; \quad (16)$$

$$k_{lt}^{org} = 0,044; \quad (17)$$

$$8,4 = k_{lp}^{ugol-min} \leq k_{lp}^{ugol} \leq k_{lp}^{ugol-max} = 9,3; \quad (18)$$

$$k_{lt}^{ugol} = 0,33. \quad (19)$$

На основании неравенств (16), (18) и равенств (17), (19) определим максимальный диапазон изменения для k_{lp} и k_{lt} :

$$8,4 = k_{lp}^{min} \leq k_{lp} \leq k_{lp}^{max} = 70,6;$$

$$0,044 = k_{lt}^{min} \leq k_{lt} \leq k_{lt}^{max} = 0,33.$$

Следовательно, возникает задача в идентификации текущего значения нестационарных коэффициентов k_{lp} и k_{lt} . Идентификация может быть выполнена любым из известных методов, например, представленных в [6,7].

Синтез контура управления непрерывным дозированием материалов

Передаточная функция контура управления непрерывным дозированием материалов по управляющему воздействию имеет вид [8]:

$$W_{st}(s) = \frac{G_1}{G_1^{zad}} = \frac{W_{or}^{st}(s)}{1 + W_{or}^{st}(s) \cdot W_{os}^{st}(s)}, \quad (20)$$

где

$W_{or}^{st}(s)$ – передаточная функция объекта регулирования контура управления;

$W_{os}^{st}(s)$ – передаточная функция контура обратной связи;
 G_1^{zad} кг/с – заданный расход материала.

Динамические характеристики ЧРП определяют настройки корректирующего устройства в контуре обратной связи регулятора непрерывного дозирования материалов. В контуре обратной связи используется типовой пропорционально-интегральный регулятор (ПИ – регулятор) [9]:

$$W_{os}^{st}(s) = \frac{\omega_{zad}^{CRP}}{\varepsilon} = k_p + \frac{k_i}{s} = \frac{k_p s + k_i}{s}, \quad (21)$$

где

ε , кг/с – рассогласование на входе ПИ – регулятора;
 k_p , с/кг – коэффициент усиления пропорциональной составляющей ПИ – регулятора;
 k_i , с/кг – коэффициент усиления интегральной составляющей ПИ – регулятора.

Рассогласование ε определяется по формуле:

$$\varepsilon = G_1^{zad} - G_1^{vic},$$

где

G_1^{vic} , кг/с – вычисленное значение расхода материала.

Вычисленное значение расхода материала определяется по формуле:

$$G_1^{vic} = G_1' + G_1'',$$

где

G_1'' , кг/с – сигнал с выхода предиктора Смита.

Критерии качества переходного процесса для контура управления непрерывным дозированием материалов задаются степенью устойчивости η и колебательностью μ [10].

$$\eta = 1,84; \quad \mu = 0. \quad (22)$$

Критерии качества переходного процесса (22) определяют расположение корней характеристического полинома (23) на фазовой плоскости [10].

$$D(s) = \lambda^2 + 6,3\lambda + 8,2 = 0, \quad (23)$$

где

λ – корни характеристического полинома, определяющие вид переходного процесса в замкнутом контуре управления непрерывным дозированием сыпучих материалов.

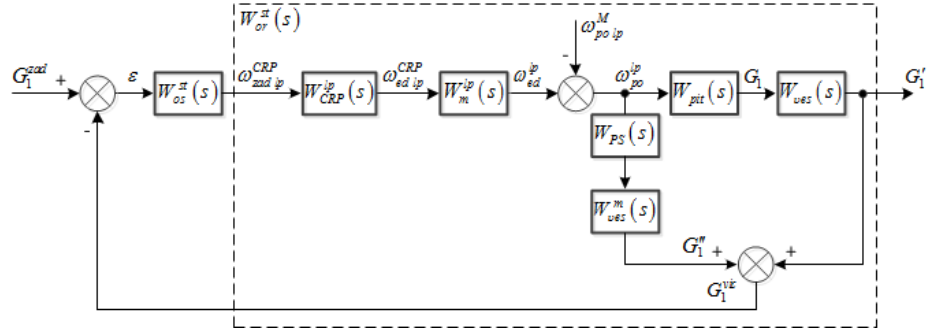


Рисунок 3. Структурная схема контура управления непрерывным дозированием сыпучих материалов. Здесь: $W_{PS}(s)$ – передаточная функция предиктора Смита; $W_{ves}^m(s)$ – передаточная функция модели весоизмерителя (10).

В контуре обратной связи автоматической системы регулирования (АСР) используется предиктор Смита. Реализация предиктора Смита [11] по схеме, изображенной на рис. (3), позволяет исключить его недостатки, описанные в [12].

На вход предиктора Смита подается частота вращения, измеренная тахометром ЧРП, а его выход суммируется со значением G_1' , измеренным весоизмерителем. Возмущения, возникающие со стороны лопастного питателя – изменение момента на валу электродвигателя M_{ed} , приводящего его во вращение, компенсируются внутренним контуром управления ЧРП (контур на рис. 3, 4 не показан). Увеличение момента M_{ed} на валу электродвигателя может приводить к кратковременному отклонению его частоты вращения на величину произведения $k_m^{lp} \omega_{lp}^M$. Передаточная функция предиктора Смита имеет вид [11]:

$$W_{PS}(s) = \frac{G_1''}{\omega_{lp}} = k_{lp}(1 - e^{-\tau_{ts}}).$$

Определим по рис. 3 передаточную функцию $W_{or}^{st}(s)$ единой механической системы, изображенной на рис. 2, как объекта регулирования по расходу материала G_1' при $\omega_{lp}^M = 0$ (отсутствии возмущения по частоте вращения лопастного питателя):

$$W_{or}^{st}(s) = W_{CRP}^{lp}(s) \cdot W_m^{lp}(s) [W_{PS}(s) \cdot W_{ves}^m(s) + W_{pit}(s) \cdot W_{ves}(s)],$$

$$W_{or}^{st}(s) = W_{CRP}^{lp}(s) \cdot W_m^{lp}(s) [k_{lp}(1 - e^{-\tau_{ts}}) \cdot W_{ves}^m(s) + (W_{pit}(s) \cdot W_{ves}(s))], \quad (24)$$

Для определения k_p и k_i упростим передаточную функцию (24) в соответствии с принципами, изложенными в [9]: $W_m^{lp}(s) \approx k_m^{lp}$ и $W_{ves}^m(s) = W_{ves}(s) \approx 1$:

$$W_{or}^{st}(s) \approx W_{CRP}^{lp}(s)k_m^{lp} [k_{lp}(1 - e^{-\tau_{it}s}) + W_{pit}(s)]. \quad (25)$$

Допущения (25) приняты с целью упрощения реализации предиктора Смита (рис. 4). В случаях, если известна динамика весоизмерительного устройства, и оно достаточно инерционное (постоянная времени апериодического звена весоизмерительного устройства составляет секунды или десятки секунд), должна быть реализована схема, изображенная на рис. 3. Эта схема учитывает динамику весоизмерительного устройства, что повышает точность модели объекта регулирования в предикторе Смита.

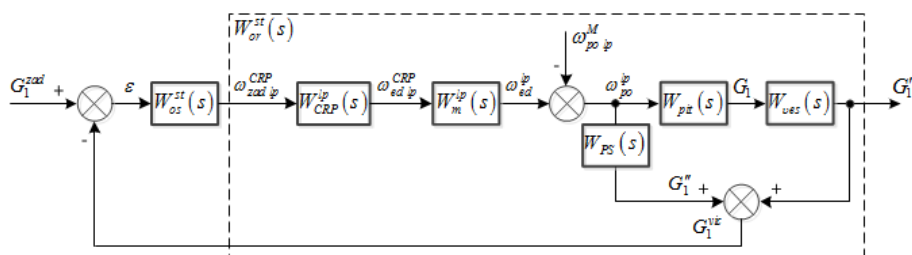


Рисунок 4. Структурная схема контура управления непрерывным дозированием сыпучих материалов с упрощенной моделью объекта регулирования в предикторе Смита.

Из выражения (25), получена передаточная функция объекта регулирования:

$$W_{or}^{st}(s) = k_m^{lp}k_{lp}W_{CRP}^{lp}(s). \quad (26)$$

С учетом (9) передаточная функция (26) примет вид

$$W_{or}^{st}(s) = \frac{k_m^{lp}k_{lp}}{T_{CRP}^{lp}s + 1}. \quad (27)$$

Передаточная функция контура управления непрерывным дозированием материалов по управляющему воздействию (20) с учетом (21), (27) примет вид:

$$W_{st}(s) = \frac{k_m^{lp}k_{lp}s}{T_{CRP}^{lp}s^2 + (k_m^{lp}k_{lp}k_p)s + k_m^{lp}k_{lp}k_i}. \quad (28)$$

Используя характеристическое уравнение передаточной функции контура управления непрерывным дозированием сыпучих материалов (28) и полином (23), определяющий заданное расположение на фазовой плоскости полюсов замкнутого контура системы регулирования, из выражений (29) определим настройки ПИ – регулятора:

$$k_p = \frac{6,3 \cdot T_{CRP}^{lp} - 1}{k_m^{lp} k_{lp}}; \quad k_i = \frac{8,2 \cdot T_{CRP}^{lp}}{k_m^{lp} k_{lp}}. \quad (29)$$

При подстановке числовых значений параметров T_{CRP}^{lp} , k_m^{lp} , $k_{lp}^{min/max}$ в (29) получим: $k_p^{min} = 1,38$, $k_i^{min} = 1,95$ и $k_p^{max} = 0,16$, $k_i^{max} = 0,23$.

Нуль передаточной функции (28) $s = 0$ означает, что реализовано астатическое регулирование [13], т.к. в состав ПИ-регулятора входит интегральная составляющая.

Определено, что вследствие изменения характеристик дозируемого материала коэффициент k_{lp} является нестационарным. Для компенсации изменения значения k_{lp} в уравнениях (29) предлагается (вместо k_{lp}) использовать коэффициент k'_{lp} , определяемый в ходе непрерывной идентификации k_{lp} объекта регулирования (1). В этом случае при изменении k_{lp} по уравнениям (29) будет выполняться пересчет коэффициентов k_p и k_i . В результате этого изменение k_{lp} не будет приводить к изменению показателей переходных процессов в контуре управления непрерывным дозированием материалов (рис. 3, 4), определяемых полиномом (23).

Моделирование работы контура управления непрерывным автоматическим дозированием сыпучих материалов

Выполнено моделирование работы контура управления непрерывным дозированием сыпучих материалов, изображенного на рис. 4, для цифровой формы реализации. Рассмотрено изменение производительности установки дозирования с 0кг/с до 5кг/с. Для структурной схемы, изображенной на рис. 4, рассмотрены случаи, когда транспортное запаздывание τ_{it} не равно нулю и:

1. предиктор Смита отключен;
2. предиктор Смита включен.

По виду переходного процесса для случая 1, приведенного на рис. 5 (кривая 1), можно видеть, что автоматическая система управления непрерывным дозированием материалов (рис. 4) не работоспособна. При изменении величины заданного расхода материала G_1^{zad} не происходит установления расхода материала равного G_1^{zad} с динамикой, описываемой полиномом (23). Наблюдаются периодические скачкообразные изменения расхода материала. Следовательно, система управления непрерывным дозированием материалов не работоспособна.

Случай 2 является основным рассматриваемым режимом работы контура управления непрерывным дозированием сыпучих материалов (см. рис. 4). По виду переходного процесса для случая 2, приведенного на рис. 5 (кривая 2), можно видеть, что автоматическая система управления непрерывным дозированием материалов (рис. 4) работоспособна. При изменении

величины заданного расхода материала G_1^{zad} происходит установление расхода материала G'_1 равного G_1^{zad} с динамикой, описываемой полиномом (23).

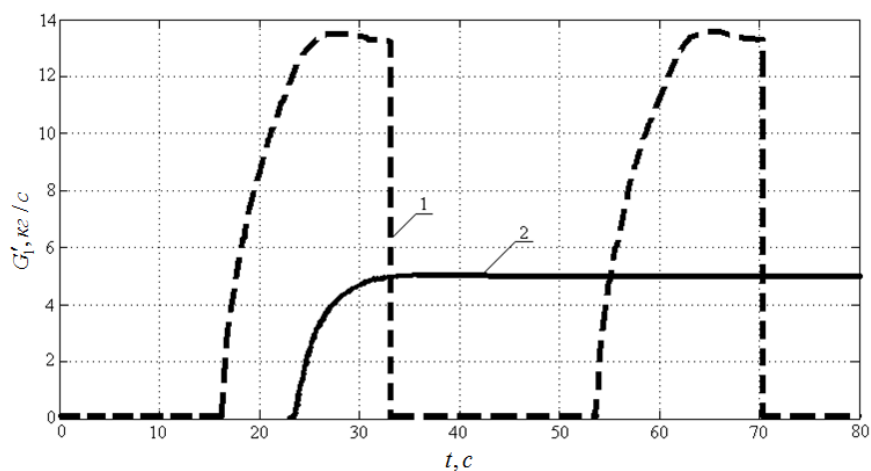


Рисунок 5. Переходный процесс для автоматического контура непрерывным дозированием материалов, изображенного на рис. 4. Здесь: 1 – переходный процесс в автоматическом контуре непрерывным дозированием материалов для случая 1 (сигнал G'_1 , рис.4); 2 – переходный процесс в автоматическом контуре непрерывным дозированием материалов для случая 2 (сигнал G'_1 , рис.4)

Выводы

1. Создана математическая модель единой механической системы, изображенной на рис. 2, как объекта регулирования по расходу материала. Для неё разработаны алгоритмы управления непрерывным дозированием материала. Выполнено моделирование их работы. Показано, что использование типовых алгоритмов для управления механической системой, изображенной на рис. 2 не приводит к установлению G'_1 в соответствии с заданным расходом материала G_1^{zad} (рис. 5), т.е. система управления в этом случае не работоспособна. Доказана работоспособность предложенной схемы контура управления непрерывным дозированием сыпучих материалов (рис. 3, 4).
2. Предложена реализация схемы предиктора Смита, которая обеспечивает работоспособность в системах управления с переменным транспортным запаздыванием. Переменная величина транспортного запаздывания зависит от частоты вращения опорных роликов ленточного транспортера (скорости перемещения ленты транспортера). Но при этом величина транспортного запаздывания может быть вычислена. Частота вращения

опорных роликов ленточного транспортера связана линейной зависимостью с частотой вращения лопастного питателя. Задание по частоте вращения лопастного питателя является выходным сигналом регулятора. Схемы регулирования, приведенные на рис. 3, 4, рассмотрены на примере системы непрерывного дозирования сыпучего материала, но могут быть использованы для подобных типов объектов регулирования, когда транспортное запаздывание объекта регулирования не постоянно и изменяется в зависимости от выходного сигнала регулятора.

Список литературы

1. Вильчек С.Ю., Гаркуша В.В., Квашнин А.Г., Мишнев А.С., Сторожев Ф.Н., Яковлев В.В. Компоненты автоматизированной системы управления процессами переработки биомассы в тепло и энергоносители во вращающемся термохимическом реакторе // Вычислительные технологии, 2013. Т.18. Специальный выпуск: Труды Всероссийской конференции «Индустриальные информационные системы – 2013». – С. 139 – 143.
2. Писарев А.В., Новиков С.И. Использование предиктора Смита в автоматических системах регулирования теплоэнергетических процессов // Энергосистемы, электростанции и их агрегаты: сб. науч. тр. – Вып. 12 / под ред. акад. РАН В.Е. Накорякова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – С. 169 – 196.
3. Видинеев Ю.Д. Дозаторы непрерывного действия. – М.: Энергия, 1978. – 184 с.
4. Шадрин Г.К., Аринова Н.В. Математическая модель процесса дозирования компонентов силикатной смеси // Вестник ВКГТУ. – 2009. - №3. – С. 96 – 102.
5. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
6. Куропаткин П.В. Оптимальные и адаптивные системы. – М.: Высш. шк., 1980.–287 с.
7. Громыко В.Д., Санковский Е.А. Самонастраивающиеся системы с моделью. – М.: Энергия, 1974. – 80 с.
8. Востриков А.С. Теория автоматического регулирования: Учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – М.: Высш. шк., 2004.–365 с.
9. Фрер Ф., Орттенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования. Пер. с нем. М.: Энергия, 1973. – 192 с.
10. Литвинов Н.Д. Метод расположения корней характеристического полинома, обеспечивающий заданные степень устойчивости и колебательность системы // Автоматика и телемеханика. – 1995. – №4. – С. 53 – 61.
11. Денисенко В.В. ПИД – регуляторы: принципы построения и модификации. Часть 2 // Современные технологии автоматизации. – 2007. – №1. – С. 78 – 88.
12. Филимонов А.Б. Спектральный метод построения упредителей для объектов с запаздыванием / А.Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006.–№6.–С. 2–9.
13. Кузовков Ю.К. Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Наука, 1976.–184 с.