

УДК 681.5.08

С. Г. УДОВЕНКО<sup>1</sup>, Н. Д. КОШЕВОЙ<sup>2</sup>, Е. Е. КАЛАШНИКОВ<sup>2</sup>, В. П. СИРОКЛЫН<sup>2</sup><sup>1</sup> Харьковський національний університет радіоелектроніки, Україна<sup>2</sup> Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Україна**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДОЗИРОВАНИЯ**

*Предложен вариант системы управления непрерывным дозированием сыпучих материалов, предполагающий использование двухконтурного цифрового управления выходной производительностью и углом наклона лотка в зависимости от влажности дозируемого материала. Проведено моделирование контуров цифрового управления производительностью и углом наклона лотка. Получены передаточные функции, наилучшим образом аппроксимирующие динамические свойства идентифицируемого объекта, по каналу регулирования производительности и каналу регулирования угла наклона лотка.*

**Ключевые слова:** автоматизация, управление, весоизмерительный лоток, микроконтроллер, сыпучий материал, непрерывность дозирования, погрешность дозирования.

**Введение**

В настоящей статье рассмотрены задачи автоматизации управления непрерывным дозированием сыпучих материалов, подающихся на весоизмерительный лоток с электроприводом по транспортеру конвейерного типа с электроприводом. Предложенный вариант системы управления дозированием предполагает использование двухконтурного цифрового управления выходной производительностью и углом наклона лотка в зависимости от влагосодержания дозируемого материала [1, 2].

**Постановка задачи исследования**

Одной из наиболее важных задач систем непрерывного дозирования является обеспечение равномерной подачи материала строго в соответствии с рецептурой, что становится возможным лишь за счет повышения качества процесса управления. Таким образом, актуальным представляется проведе-

ние моделирования контуров цифрового управления углом наклона лотка и производительностью.

**Изложение основного материала**

На рис. 1 представлена общая структура технологической линии конвейерно-лоткового дозирования сыпучих материалов [3], содержащая подсистему измерения текущей массы и исполнительные механизмы. В бункере 1 с дозируемым сыпучим материалом расположен электровибратор 2 и датчик 3 влажности материала. Под бункером установлен ленточный конвейер 4, на котором установлены: концевые выключатели 5, датчик 6 растяжения ленты конвейера, датчик 7 скорости движения ленты конвейера и электропривод 8 конвейера. Под конвейером закреплен автоматизированный весоизмерительный лоток 12, связанный шарнирным соединением с тензометрическими датчиками силы 9, 10, демпфером 11, и датчик 13 температуры.

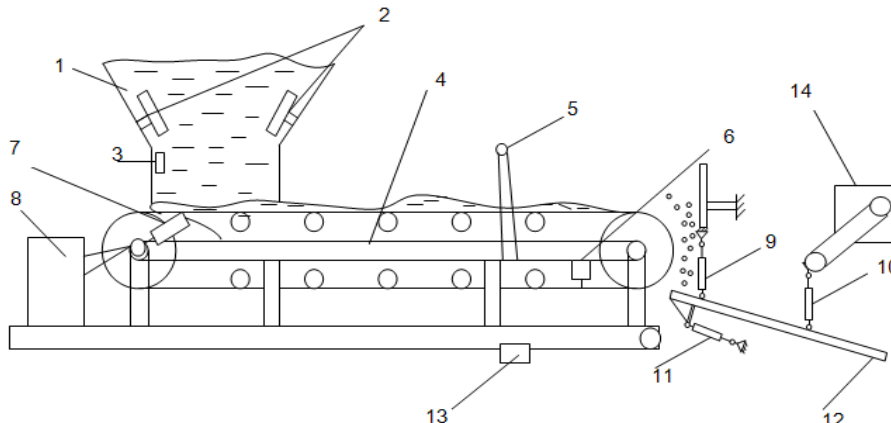


Рис. 1. Схема конвейерно-лоткового дозирования сыпучих материалов с весоизмерительной системой лоткового типа

Тензометрический датчик 10 закреплен на электроприводе 14. Задачей системы управления рассматриваемой технологической линией является целенаправленное изменение параметров и режимов технологического процесса дозирования, обеспечение требуемой производительности и погрешности дозирования, схема процесса дозирования как объекта управления приведена на рис. 2.

Очевидно, что при использовании дозатора для приготовления сыпучих смесей погрешность весоизмерительной системы непосредственно влияет на качество выходного продукта. Учитывая, что параметром, оказывающим наибольшее влияние на точность дозирования, является влажность сыпучего материала [4], контролируемая с помощью датчика влажности в расходном бункере, в упрощенном варианте системы управления для формирования задающих уставок в контуре управления углом наклона лотка можно ограничиться применением зависимости вида «влажность материала – желаемое значение угла наклона лотка».

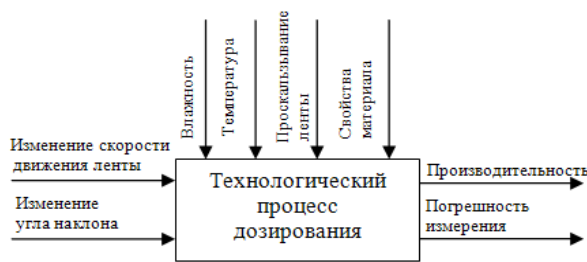


Рис. 2. Схема процесса дозирования как объекта управления

На рис. 3 приведена схема контура цифрового управления производительностью дозирующей линии. На схеме приняты следующие обозначения:  $y_1(t)$  – текущее значение производительности линии (определяется с применением весоизмерительного лотка);  $y_1^0(t)$  – заданное значение производительности линии (задается ЦВМ верхнего уровня АСУ ТП);  $e_1(t)$  – сигнал ошибки управления;  $U_1(k)$  – управляющее воздействие; АЦП 1 – аналого-цифровой преобразователь; ЦР 1 – цифровой регулятор;

лятор; ЦАП 1 – цифро-аналоговый преобразователь; ИМ 1 – исполнительный механизм (электропривод конвейера); ОУ 1 – конвейерно-лотковый дозатор с тензодатчиками;  $G_1(s)$  – передаточная функция непрерывной части контура;  $t, k$  – аргументы непрерывного и дискретного времени соответственно.

На рис. 4 приведена схема контура цифрового управления углом наклона весоизмерительного лотка. На схеме приняты следующие обозначения:  $W(t)$  – текущее значение влажности сыпучего материала (определяется с помощью датчика влажности в расходном бункере);  $y_2(t)$  – текущее значение угла наклона весоизмерительного лотка (определяется с помощью датчика угла наклона);  $y_2^0(t)$  – заданное значение угла наклона весоизмерительного лотка (задается с помощью модели задания угла наклона);  $e_2(t)$  – сигнал ошибки управления;  $U_2(k)$  – управляющее воздействие; АЦП 2 – аналого-цифровой преобразователь; ЦР 2 – цифровой регулятор; ЦАП 2 – цифро-аналоговый преобразователь; ИМ 2 – исполнительный механизм (электропривод лотка); ОУ 2 – весоизмерительный лоток с датчиком угла наклона;  $G_2(s)$  – передаточная функция непрерывной части контура;  $t, k$  – аргументы непрерывного и дискретного времени соответственно.

Отметим, что схемы управления, приведенные на рис. 3 и рис. 4, можно считать независимыми, так как модель задания угла наклона лотка не зависит от скорости перемещения сыпучего материала по лотку а, следовательно, независимыми являются регулируемые переменные  $y_1(t)$  и  $y_2(t)$ .

Для реализации функций управления в каждом из двух контуров необходимо определить передаточные функции непрерывной части, выбрать элементы для технической реализации системы (преобразователи, микроконтроллер), задать структуру и определить параметры цифровых регуляторов, рассчитать параметры весоизмерительной системы лоткового типа.

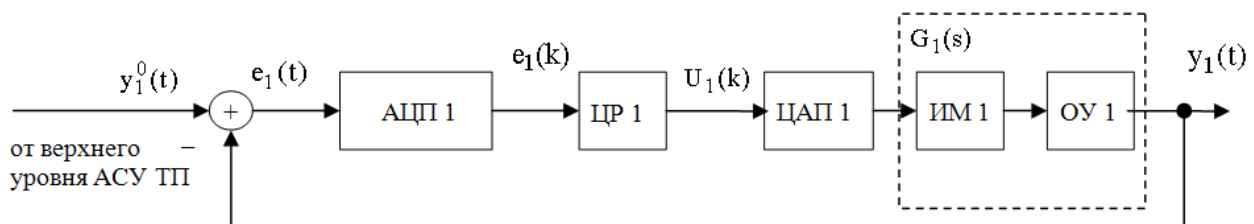


Рис. 3. Контур управления производительностью дозатора

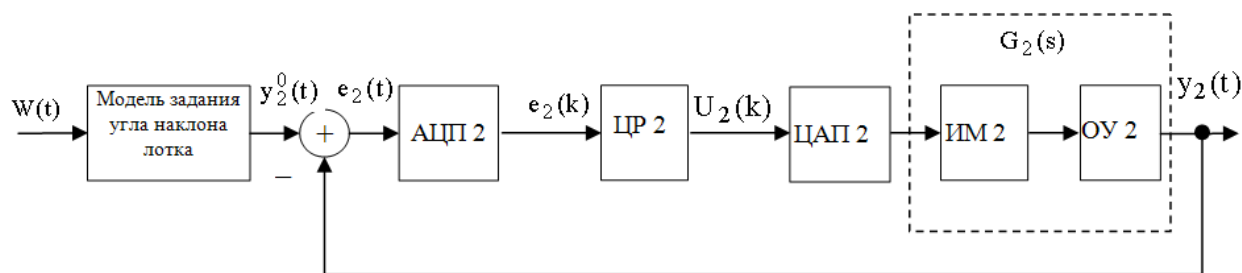


Рис. 4. Контур управления углом наклона весоизмерительного лотка

Необходимо предусмотреть два режима управления в каждом из контуров – штатный и внештатный. Под штатным режимом подразумевается режим нормальной эксплуатации технологической линии дозирования в соответствии с заданием оператора верхнего уровня АСУ ТП [5].

Внештатные режимы характеризуются возникновением вынужденных сбоев, связанных с поломкой оборудования, налипанием материала и обрушением свода в бункере и т.д. При возникновении внештатных режимов должна быть предусмотрена автоматическая блокировка работы оборудования по аварийным сигналам с последующим устранением неисправностей (в частности, для ликвидации налипания материала в бункере используется электровибратор).

Реализацию алгоритмов цифрового управления для рассмотренных контуров определения задающего воздействия  $y_2^0(t)$  и выработки сигналов включения электровибратора (в нештатном режиме) целесообразно осуществлять с помощью одного общего универсального микроконтроллера.

Поступление сыпучего материала на весоизмерительный лоток регулируется изменением скорости движения ленты конвейера. Изменение скорости движения ленты конвейера осуществляется блоком управления электропривода путем подачи на него соответствующего сигнала от микроконтроллера, реализующего закон управления цифрового регулятора ЦР 1 (см. рис. 3).

В случае, когда текущий расход совпадает с заданным оператором, система продолжает работать без изменений. Если расход сыпучего материала недостаточен, то микроконтроллер выдает сигнал выхода ЦР 1 на электропривод конвейера для увеличения скорости движения конвейерной ленты.

Если расход сыпучего материала избыточен, то микроконтроллер выдает сигнал выхода ЦР 1 на электропривод конвейера для уменьшения скорости движения конвейерной ленты. Процесс регулировки скорости движения ленты конвейера происходит до тех пор, пока расход сыпучего материала не будет соответствовать заданному.

Для учета влияния влажности сыпучего материала используется датчик 3, расположенный в щелевом бункере. Сигнал от датчика влажности подается в блок определения задающего воздействия для контура управления углом наклона весоизмерительного лотка, реализующего закон управления цифрового регулятора ЦР 2 (см. рис. 4).

Очевидно, что динамические модели, используемые в рассмотренных выше каналах цифрового управления производительностью и углом наклона лотка, могут иметь свои особенности, связанные со спецификой конкретных технологических линий дозирования. В то же время отличия между моделями и цифровыми регуляторами для различных дозаторов, построенных по рассматриваемой в настоящей статье схеме, приведенной выше на рис. 1, не являются принципиальными. В этом смысле предложенный подход к построению систем автоматизированного управления процессами дозирования сыпучих материалов на основе применения весоизмерительного лотка является достаточно универсальным.

Для построения динамических моделей непрерывной части системы управления (по каналам управления производительностью и углом наклона лотка) были использованы данные пассивного регистрационного эксперимента.

Результаты измерений использовались в качестве исходных данных для расчета параметров динамической модели объекта управления по модифицированному методу площадей Симою [6, 7]. Динамические свойства непрерывной части системы управления (по каналам управления производительностью и углом наклона лотка) аппроксимировались моделью следующего вида:

$$W_M(s) = K \frac{1 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_m s^m}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n} e^{s\tau},$$

где  $K$  – коэффициент усиления;  $\tau$  – время запаздывания;  $a_i, b_i$  – коэффициенты передаточной функции.

Для построения передаточных функций были выбраны интервалы обработки данных пассивного регистрационного эксперимента, отражающие характер протекания процесса при изменении производительности от 0,8 до 1,2 т/ч и при изменении значения влажности шихты в бункере от 5 до 11%.

В результате были получены следующие передаточные функции, наилучшим образом аппроксимирующие динамические свойства идентифицируемого объекта:

а) по каналу регулирования производительности

$$G_1(s) = \frac{5,07}{1,21S^2 + 3,75S + 1,09} e^{3S},$$

б) по каналу регулирования угла наклона лотка

$$G_2(s) = \frac{3,25}{0,35S^2 + 2,1S + 1,1} e^{3S}.$$

Передаточные функции  $G_1(s)$  и  $G_2(s)$  были использованы для определения параметров цифровых регуляторов ЦР 1 (контур управления производительностью) и ЦР 2 (контур управления углом наклона лотка) и моделирования работы микроконтроллерной системы управления дозированием шихты.

В качестве регуляторов выбраны цифровые ПИД-регуляторы. Моделирование было реализовано в среде Matlab 6.5 [8, 9]. Общая схема моделирования представлена на рис. 5.

Структура ПИД-регуляторов, используемых в общей схеме моделирования, приведена на рис.6. Для объектов управления с передаточными функциями  $G_1(s)$  и  $G_2(s)$  были получены следующие значения коэффициентов цифровых ПИД-регуляторов:

а) контур управления производительностью:  $K_i=0,0410$ ;  $K_d=0,0898$ ;  $K_p=0,1580$ ;

б) контур управления углом наклона лотка:  $K_i=1,192$ ;  $K_d=0,01628$ ;  $K_p=2,533$ .

При моделировании имитировались скачкообразные положительные и отрицательные изменения уставок системы на входе. Моделируемая транспортная задержка принималась равной 3 сек (средняя задержка конвейера линии дозирования, для которой ранее проводился регистрационный эксперимент).

Амплитуда скачков на входе схем моделирования была выбрана соответствующей амплитуде скачков во фрагментах регистрационных экспериментов, использованных для динамической идентификации объектов управления. Результаты моделирования контуров цифрового управления производительностью и углом наклона лотка приведены соответственно на рис. 7 и 8.

Результаты моделирования свидетельствуют о хорошем качестве синтезированной системы цифрового управления (время переходных процессов – 2,3 с и 1,8 с для каналов управления производительностью и углом наклона лотка соответственно; перерегулирование – 2,1% и 3,8% для каналов управления производительностью и углом наклона лотка соответственно).

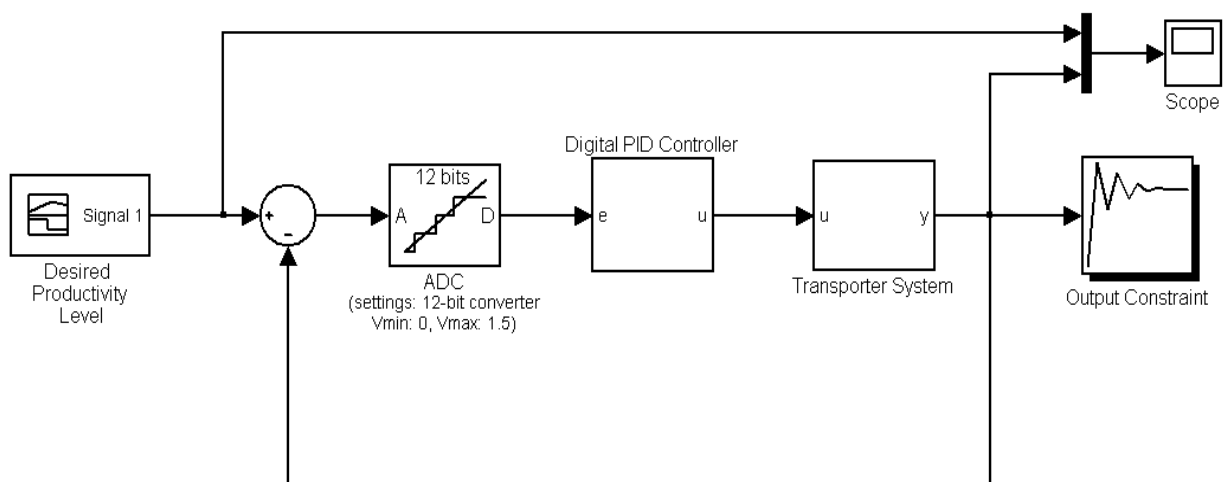


Рис. 5. Общая схема моделирования контуров управления процессом дозирования

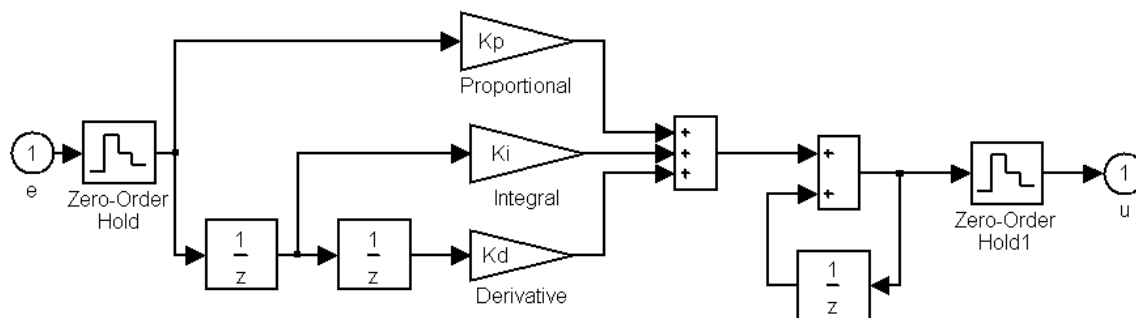


Рис. 6. Схема моделирования регуляторов системы управления процессом дозирования

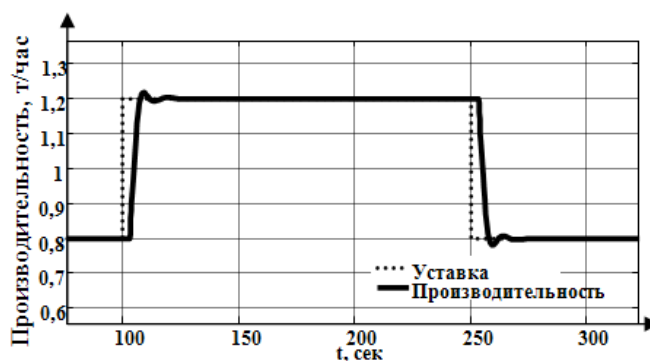


Рис. 7. Результаты моделирования контура цифрового управления производительностью

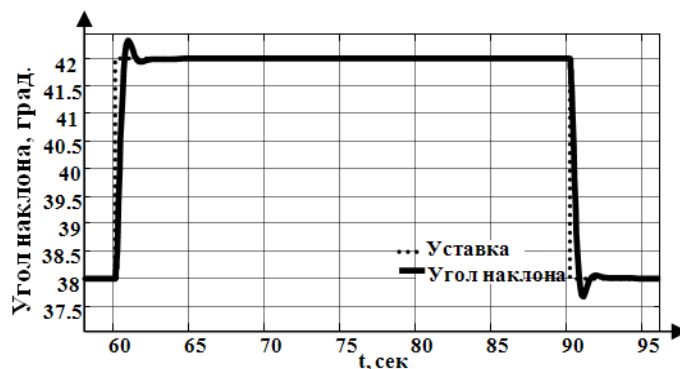


Рис. 8. Результаты моделирования контура цифрового управления углом наклона лотка

## Заклучение

В данной статье проведено моделирование варианта автоматизированной весоизмерительной системы, учитывающее недостатки ранее известных весоизмерительных систем, в которых весоизмерительные датчики встраиваются в ленточный конвейер. Получены передаточные функции, наилучшим образом аппроксимирующие динамические свойства идентифицируемого объекта, по каналу регулирования производительности и каналу регулирования угла наклона лотка. Проведено моделирование контуров цифрового управления производительностью

и углом наклона лотка. Результаты моделирования свидетельствуют о хорошем качестве синтезированной системы цифрового управления.

## Литература

1. Калашиков, Е. Е. Экспериментальное исследование весоизмерительной системы непрерывного действия [Текст] / Е. Е. Калашиков, Н. Д. Кошевой, Г. А. Черепанук // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 35. – Х., 2007. – С. 196 – 199.

2. Шубин, И. Н. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства [Текст]: учеб. пособие для вузов / И. Н. Шубин, М. М. Свиридов, В. П. Таров; Мин-во общ. и проф. образования Рос. Федерации, Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 76 с.

3. Пат. 27285 Украина, МПК G 01 F 11/00. Весоизмерительная система [Текст] / Кошевой Н. Д., Черепашук Г. А., Калашиников Е. Е.; Заявитель и патентообладатель Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». – № и200706404; заявл. 08.06.07; опубл. 25.10.07, Бюл. N 17. – 3 с.: ил.

4. Весовое дозирование зернистых материалов [Текст] / С. В. Першина, А. В. Катыльмов, В. Г. Однолько и др. – М.: Машиностроение, 2009. – 260 с.

5. Белов, М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов

и технологических комплексов [Текст]: учеб. пособие для вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 576 с.

6. Симою, М. П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев систем регулирования [Текст] / М. П. Симою // Автоматика и телемеханика. – 1957. – № 6. – С. 514–527.

7. Изерман, Р. Цифровые системы управления [Текст] / Р. Изерман. – М.: Мир, 1984. – 541 с.

8. Проектирование систем управления на ЭВМ (MATLAB/Simulink/Control System) [Текст] / Ю. Н. Соколов, А. Ю. Соколов, В. М. Илюшко и др. – Х.: «ХАИ», 2005. – 582 с.

9. Дьяков, В. П. MATLAB 6.5 SP1/&+Simulink 5/6. Основы применения. Серия «Библиотека профессионала» [Текст] / В. П. Дьяков. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 800 с.

Поступила в редакцию 20.12.2013, рассмотрена на редколлегии 12.02.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., профессор кафедры информатики М. Л. Угрюмов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ДОЗУВАННЯ

*С. Г. Удовенко, М. Д. Кошовий, Є. Є. Калашиников, В. П. Сіроклін*

Запропоновано варіант системи керування безперервним дозуванням сипких матеріалів, що передбачає використання двуконтурного цифрового керування вихідною продуктивністю та кутом нахилу лотка в залежності від вологості матеріалу що дозується. Проведено моделювання контурів цифрового керування продуктивністю та кутом нахилу лотка. Отримано передаточні функції, які найкраще апроксимують динамічні властивості об'єкту, що ідентифікується, по каналу регулювання продуктивності та каналу регулювання кута нахилу лотка.

**Ключові слова:** автоматизація, керування, ваговимірювальний лоток, мікроконтролер, сипкий матеріал, безперервність дозування, похибка дозування.

## THE MODELING CONTROL SYSTEM PROCESS OF DOSING

*S. G. Udovenko, N. D. Koshevoy, E. E. Kalashnikov, V. P. Siroklin*

A version of the control system continuous dosing of loose materials. The control system uses two-contour of digital control output capacity and angle of slope of tray, depending on the humidity of the dosing material. The simulation of contours of digital control output capacity and angle of slope of tray is performed. Received transfer functions best approximating dynamic properties of the identifiable object, on the channel of control output capacity and channel of control angle of slope of tray.

**Key words:** automation, control, weight-metering tray, microcontroller, loose material, continuity of dosing, dosing inaccuracy.

**Удовенко Сергей Григорьевич** – д-р техн. наук, проф., профессор кафедры электронных вычислительных машин (ЭВМ), Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.

**Кошевой Николай Дмитриевич** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Калашиников Евгений Евгеньевич** – ассистент каф. авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: kalashnikofe@mail.ru.

**Сіроклін Віталій Павлович** – ассистент каф. авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.