

УДК 621.867.2

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-116-123

Повышение точности взвешивания сыпучих материалов на поточном расходомере-дозаторе с двумя тензометрическими датчиками

Д.В. Шилин, Д.А. Шестов, П.Е. Ганин

Разработан и исследован алгоритм взвешивания для поточного расходомера-дозатора на базе двух тензометрических датчиков. Основные задачи — повышение точности дозирования сыпучих материалов и предотвращение влияния неравномерного распределения материала вдоль оси взвешивания.

Основой повышения точности дозирования является установка тензометрических датчиков со стороны подачи материала и использование интеллектуальной системы управления скоростью конвейерной ленты, являющейся основным элементом в разработанном алгоритме взвешивания. Скорость конвейерной ленты корректируется с помощью регулятора на базе нечеткой логики (фаззи-регулятора), так как объект регулирования представляет собой сложную систему и регуляторы из классической теории ТАУ не удовлетворяют требованиям по быстрдействию. Результаты испытания выбранной кинематической конструкции наглядно показывают адекватную работу фаззи-регулятора, а именно, при изменении подачи сыпучего материала в меньшую сторону снижается скорость движения конвейерной ленты, при увеличении — увеличивается, что позволяет добиться относительной погрешности измерения менее 0,5%.

Область применения разрабатываемого устройства относится к пищевому, аграрно-промышленному комплексам, строительной, химической промышленностям и другим отраслям народного хозяйства, а именно, процессам дозирования и измерения расхода сыпучего материала в непрерывно протекающих поточных технологических процессах. В комплекте с питающим устройством поточные расходомеры служат для весового дозирования с высокой точностью различных сыпучих материалов. Подача продукта осуществляется шлюзовым или шнековым питателем, дополнительно оснащенный шнеком меньшего диаметра для работы в режимах грубо/точно.

Ключевые слова: тензометрический датчик, фаззи-регулятор, адаптивный фильтр, дозирование, расход, сыпучий материал.

Для цитирования: Шилин Д.В., Шестов Д.А., Ганин П.Е. Повышение точности взвешивания сыпучих материалов на поточном расходомере-дозаторе с двумя тензометрическими датчиками // Вестник МЭИ. 2019. № 3. С. 116—123. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-116-123.

Improving the Accuracy of Weighing Bulk Materials in a Dispenser On-Stream Flow Meter with Two Strain Gauges

D.V. Shilin, D.A. Shestov, P.E. Ganin

A weighing algorithm for an on-stream dispenser flow meter based on two strain gauges is developed and investigated. The main objectives are to achieve more accurate dosing of bulk materials and to prevent the influence of uneven material distribution along the weighing axis. Better dosing accuracy is achieved by installing strain gages on the material feeding side and using an intelligent conveyor belt speed control system, which is the main element in the developed weighing algorithm. The conveyor belt speed is adjusted by means of a fuzzy controller, because the controlled plant is a complex system, and the controllers synthesized according to the classical automatic control theory fail to meet the response speed requirements. The results from testing the selected kinematic design clearly show adequate performance of the fuzzy controller. Namely, when the feed of bulk material decreases, so does the conveyor belt speed, and vice versa. As a result, it becomes possible to decrease the relative measurement error to less than 0.5%.

The developed device can be used in the food and agricultural-industrial complexes, in the civil construction, and chemical industries, and in other branches of the national economy, namely, in the processes involving metering and measuring the flow of bulk material in continuous technological processes. When used in combination with a feeder, on-stream flow meters can be used for high-precision weighted metering of various bulk materials. The product is supplied by a sluice or screw feeder, which can additionally be equipped with a smaller diameter screw for operation in rough/precise modes.

Key words: strain gauge, fuzzy controller, adaptive filter, metering, flow, bulk material.

For citation: Shilin D.V., Shestov D.A., Ganin P.E. Improving the Accuracy of Weighing Bulk Materials in a Dispenser On-Stream Flow Meter with Two Strain Gauges. Bulletin of MPEI. 2019;3:116—123. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-116-123.

Введение

Промышленность и сельское хозяйство в Российской Федерации увеличивают объемы производства продукции за счет внедрения интенсивных поточных линий большой производительности, поэтому в сфере смесеприготовления широко распространены процессы производства сухих комбинированных продуктов при помощи поточных расходомеров-дозаторов.

Процесс дозирования и взвешивания сырья — важный этап в производстве высококачественных сыпучих смесей. Это сложный технологический процесс, основанный на передовых достижениях науки и техники. Опыт эксплуатации действующих систем выявил высокую цену отказа технологического оборудования поточных линий в условиях интенсивного производства. Отклонения от необходимых пропорций при при-

готовлении сыпучих смесей достигают 5...10 %, а затраты на компоненты смеси составляют 70...80% её себестоимости [1]. Все это приводит к значительному перерасходу и прямым потерям компонентов сыпучих смесей, повышению себестоимости и снижению качества смеси.

Поскольку любой технологический процесс требует контроля массы исходного сырья, учета выработанной продукции, обеспечения заданного количества продукта (поддержания заданного расхода), то массово применяется весовое дозирование.

Дозирование сыпучих материалов — это механический процесс, скорость которого определяется законами физики твердого тела [2]. Благодаря датчикам расхода, установленным между питателем и смесителем, а также специальной программе автоматизированного контроля, можно существенно повысить качество приготовления сыпучих смесей и обеспечить высокую точность непрерывного весового дозирования с помощью поточного расходомера-дозатора (ПРД) на основе автоматизированной электроприводной системы ленточного транспортёра (поточной линии), используя серийно выпускаемые прецизионные тензодатчики.

В настоящее время ситуация в аграрно-промышленном комплексе (АПК), строительной, химической промышленности и других отраслях народного хозяйства такова, что ни одна из выпускаемых промышленных систем электрооборудования поточных линий дозирования не обеспечивает требуемой точности при большой производительности. При выборе дозатора следует учитывать, что фирмы-производители указывают погрешность дозирования при средней или даже при максимальной производительности. При минимальной производительности погрешности будут выше, иногда в несколько раз, поэтому задача повышения точности дозирования поточного расходомера-дозатора актуальна в современном поточном производстве большой производительности [3 — 5].

Рассмотрен поточный расходомер-дозатор (ПРД), внешний вид которого представлен на рис. 1, *а*. Конструкция в продольном разрезе и ее внутренняя часть (без стенок) изображены на рис. 1, *б*, *в*.

Основными элементами ПРД являются основной корпус устройства 3 с шкафом управления 5 и конвейером 17. Корпус ПРД состоит из устройства 1, формирующего поток в зоне загрузки материала, кожуха 2, обеспечивающего защиту внутренних элементов от внешнего воздействия, опоры 4 для фиксации устройства, зоны выгрузки 6, транспортировочных крепежей 7 и технологического отверстия для отвода пыли 8, образуемого при ссыпании материала. Устройство, формирующее равномерный поток измеряемого материала, позволяет регулировать параметры проходного сечения с помощью створок 9 и ширину потока 11. Взвешивание сыпучего материала обеспечено реализацией маятниковой конструкции. Конвейер в зоне выгрузки установлен на шаровидные опоры 16, а в зоне загрузки

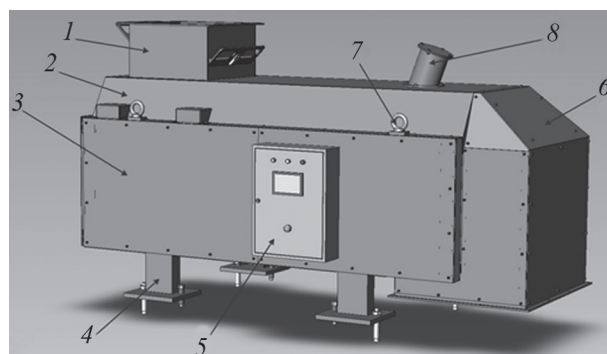
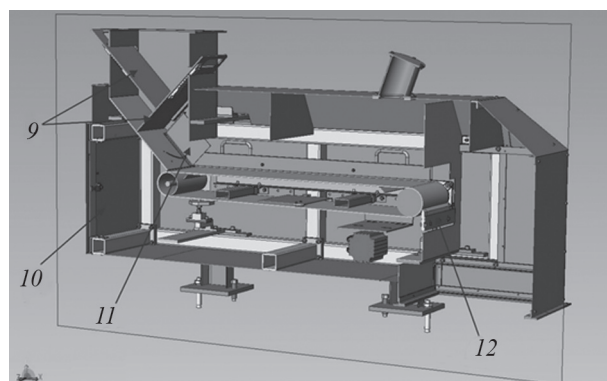
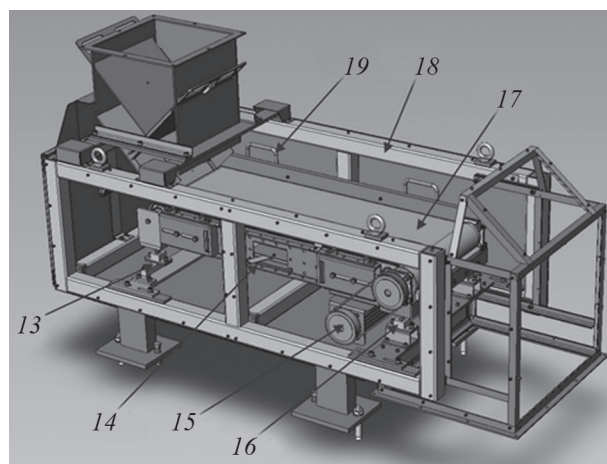

а

б

в

Рис. 1. Поточный расходомер-дозатор:

а — внешний вид; *б* — конструкция в разрезе; *в* — внутренняя часть; 1 — формирователь потока; 2 — защитный кожух; 3 — основной корпус устройства; 4 — ножка; 5 — шкаф управления; 6 — зона выгрузки; 7 — транспортировочный крепеж; 8 — пылеотсос; 9 — корректор ширины потока; 10 — дверца корпуса; 11 — ограничители потока; 12; 14 — внешняя и внутренняя щетки; 13 — тензодатчик; 15 — привод с ременной передачей; 16 — посадочное место конвейера; 17 — конвейер; 18 — основная рама; 19 — ручки конвейера

ки — на тензометрические датчики 13. Датчики и опоры конвейера крепятся на основную раму 18. Конвейерная лента перемещается посредством электрического привода 15 через ременную передачу. Конструкцией предусмотрена очистка конвейерной ленты от матери-

ала с внешней 12 и внутренней 14 сторон с помощью щеток. Для удобства монтажа и обслуживания конвейер оборудован ручками 19, а корпус — дверцей 10.

Отсутствие точного понимания, где находится мгновенная масса на конвейерной ленте, приводит к невозможности и нецелесообразности в регулировании скорости движения конвейерной ленты с целью поддержания оптимальной работы, поскольку изменение скорости движения ленты может привести как к снижению, так и существенному увеличению ошибки взвешивания.

В настоящую конструкцию ПРД добавлен второй тензометрический датчик, соосно располагающийся вдоль оси взвешивания и позволяющий точно определять положение центра масс и неравномерно распределенный сыпучий материал. Это позволит снизить ошибки дозирования. Смещение показаний датчиков относительно друг друга свидетельствует о смещении центра масс взвешиваемого материала, позволяет учитывать показатели и рассчитывать более точные данные мгновенной массы.

Для автономной работы конструкции необходимо разработать алгоритм взвешивания сыпучих материалов, поступающих на конвейерную ленту. Для этого в первую очередь следует определить мгновенную массу, поступившую на конвейерную ленту.

Определение мгновенной массы на конвейерной ленте

Пусть показания датчиков Д1 и Д2 при расположении грузов различной тяжести вдоль оси взвешивания представляют собой серию параллельных линий (рис. 2), тогда угол наклона характеристик зададим уравнением прямой на плоскости, проходящей через две точки:

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1},$$

где $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ — две точки, через которые проходит любая из представленных на рис. 2 характеристик.

Тогда

$$(y - y_1)(x_2 - x_1) = (x - x_1)(y_2 - y_1);$$

$$y(x_2 - x_1) - y_1(x_2 - x_1) = x(y_2 - y_1) - x_1(y_2 - y_1);$$

$$y = x \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} + \frac{y_1(x_2 - x_1) - x_1(y_2 - y_1)}{x_2 - x_1};$$

$$y = x \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} + \frac{y_1 x_2 - y_2 x_1}{x_2 - x_1};$$

$$y = Ax + B; \quad A = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}; \quad B = \frac{y_1 x_2 - y_2 x_1}{x_2 - x_1}.$$

Предположим, что точки определенной массы можно представить в виде функции, перпендикулярной характеристике $y = x$, что говорит о том, что среднеарифметические значения координат любой точки, лежащей на данной линейной зависимости, будут всегда равны.

Таким образом, значение текущей массы выйдет как среднеарифметическое значение показаний с двух датчиков F_T и равно

$$F_T = (x + y)/2.$$

Данное выражение позволит учесть смещение центра масс, присутствующее в показаниях датчиков.

Для составления алгоритма учета взвешенного материала следует зафиксировать уникальный вес, поступивший за определенный промежуток времени, для этого нужно предусмотреть корректировочный сигнал,

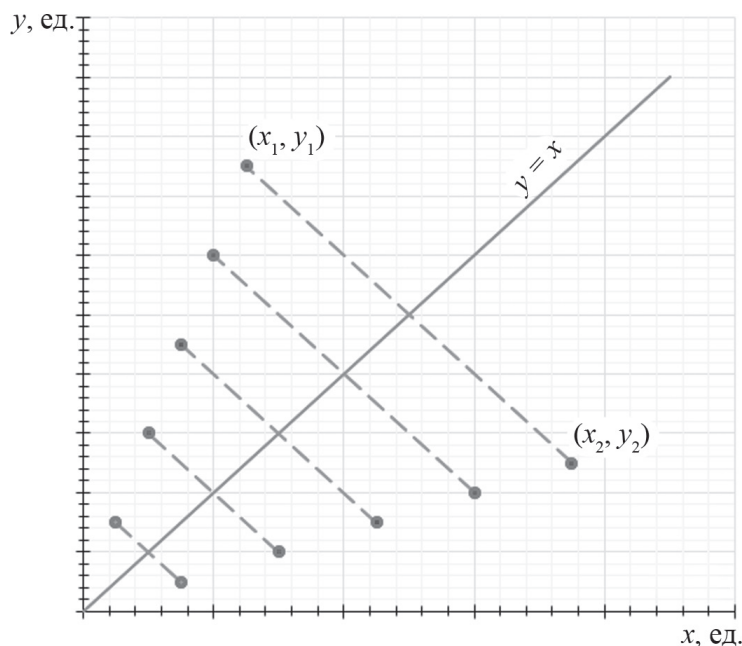


Рис. 2. Зависимость показаний x, y датчиков Д1, Д2 от перемещения массы материала вдоль оси установленных датчиков массы

содержащий в себе весь предыдущий груз, находящийся также на конвейерной ленте:

$$F = F_T - F_{\Pi},$$

где F — скорректированная мгновенная масса; F_{Π} — корректирующий сигнал, характеризующий массу материала, поступившую за предыдущий момент времени, и находящийся на конвейерной ленте.

Сам корректирующий сигнал равен [6]:

$$F_{\Pi} = \sum_{i=0}^k (F_i l_i);$$

$$l = \left[L - \sum_{j=0}^n \frac{v_{nj}}{f_j} \right] / L,$$

где l — расстояние, преодолеваемое мгновенной массой за определенный момент времени от начала координат; f — частота опроса датчиков; L , v_n — длина и скорость движения конвейерной ленты.

Таким образом, корректирующий сигнал представляет собой массив данных, состоящий из значений скорректированных мгновенных масс, умноженных на соотношение пройденного расстояния к длине конвейерной ленты. Если пройденное расстояние скорректированной мгновенной массы равно длине конвейерной ленты, то в массив данных будет записан «0», что свидетельствует о том, что данная масса упала с конвейера и не влияет на текущие показатели.

Приведем аналитическое выражение, позволяющее определить мгновенную массу сыпучего материала, поступившего на конвейерную ленту:

$$F = \frac{x_T + y_T}{2} - \sum_{i=0}^k \left[\left(\frac{x_i + y_i}{2L} \right) \left(L - \sum_{j=0}^n \frac{v_{nj}}{f_j} \right) \right].$$

Вычисление оптимальной скорости движения конвейерной ленты

Для минимизации погрешностей измерения в автоматическом режиме нужно определить оптимальную скорость движения конвейерной ленты, поскольку погрешность измерения зависит от скорости движения ленты и расхода питателя, организующего подачу сыпучих смесей на конвейер. Для минимизации ошибки взвешивания следует обеспечить работу установки в максимально нагруженном режиме. Это нужно и для того, чтобы избежать как погрешностей при работе на холостом ходу, так и нагрузки устройства выше его пропускных способностей за счет увеличения скорости движения конвейерной ленты.

Для снижения инерционности системы и влияния динамических воздействий рассчитаем среднее значение взвешенного сыпучего материала. Динамические возмущения конструкции и всевозможные кратковременные остановки (увеличение) подачи сыпучих сме-

сей не влияют на корректировку скорости, разгружая оперативное пространство вычислительной системы.

$$m_{cp} = \left(\sum_{i=0}^{\tau} \frac{\dot{m}}{f_j} \right) \tau; F = f(\dot{m}); \tau = \sum_{j=0}^n \frac{1}{f_j},$$

тогда средний объем V_{cp} равен [7]:

$$V_{cp} = m_{cp} / \rho,$$

где ρ — плотность сыпучего материала.

Исходя из конструктивных данных механизма подачи сыпучего материала на конвейерную ленту, рассчитаем максимально возможный объем материала, который способна принять установка:

$$V_{max} = \sum_{i=0}^n \left(ab \frac{v_{ni}}{f_i} \right),$$

где $S = ab$ — площадь проходного сечения, питающего устройство поточного расходомера-дозатора, обладающего прямоугольной формой шириной a и высотой b .

Отклонение от заданной загрузки ленты сыпучим материалом равно:

$$\Delta V = KV_{max} - V_{cp}.$$

Здесь K — коэффициент заполнения, $0 \leq K \leq 1$.

В итоге ΔV примет вид:

$$\Delta V = K \sum_{i=0}^n \left(ab \frac{v_{ni}}{f_i} \right) - \frac{m_{cp}}{\rho}.$$

Скорость, поддерживающую постоянно заданную величину ΔV , контролируют с помощью регулятора на базе нечеткой логики (фаззи-регулятора), поскольку объект регулирования представляет собой сложную систему, и регуляторы из классической теории ТАУ не удовлетворяют требованиям по быстродействию. Следовательно, итоговый алгоритм взвешивания выглядит как:

$$\left\{ \begin{aligned} & F = \frac{x_T + y_T}{2} - \sum_{i=0}^k \left[\left(\frac{x_i + y_i}{2} \right) \left(L - \sum_{j=0}^n \frac{v_{nj}}{f_j} \right) \right]; \\ & m_{cp} = \sum_{i=0}^{\tau} \frac{\dot{m}}{f_j} \sum_{j=0}^{\tau} f_j; \\ & \Delta V = K \sum_{i=0}^n \left(ab \frac{v_{ni}}{f_i} \right) - \frac{m_{cp}}{\rho}; \\ & v_{тек} = \text{Fuzzy}(v_n, \Delta V). \end{aligned} \right.$$

Экспериментальное определение оптимальной частоты опроса тензометрических датчиков

Для оценки погрешности измерений при взвешивании сыпучих материалов с различной частотой вы-

числений проведена серия экспериментов и построены графики зависимости относительной погрешности измерений от скорости конвейерной ленты (рис. 3). На графике рис. 3 изображены результаты экспериментов при изменении частоты вычислений алгоритма взвешивания. Вычисления проходили с максимальной частотой каждые 50, 100, 200, 400 и 800 мс. Эталонная масса груза составляла $m_3 = 8,851$ кг.

Анализируя полученные результаты, можно сделать выводы, что при увеличении скорости конвейерной ленты растет погрешность: в диапазоне скоростей от 0,1 до 0,7 м/с при высокой частоте вычислений (чаще чем 200 мс) она минимальна, а с уменьшением частоты вычислений увеличивается. При высоких скоростях конвейерной ленты (более 0,7 м/с) снижение частоты вычислений обеспечивает коррекцию алгоритма взвешивания и тем самым понижает погрешность.

Экспериментальное вычисление оптимальной скорости движения конвейерной ленты

Выполнены исследования при различных скоростях движения конвейерной ленты и подачи сыпучего материала на ПРД. По результатам экспериментов можно вывести диапазон скоростей, на котором наблюдалась наименьшая ошибка дозирования при отработке заявляемого алгоритма (табл. 1).

Примечателен тот факт, что при подаче сыпучего материала в 20% от максимально возможного и изменении скорости движения конвейерной ленты массовый расход оставался неизменным (рис. 4). Это свидетельствует о том, что корректировка скорости может повлиять только на результаты дозирования при малой подаче сыпучих материалов.

Для устранения шума в показаниях силоизмерительных датчиков разработан адаптивный фильтр, корректирующий сигнал в зависимости от скорости движения конвейерной ленты [8]. Его работа заключается в использовании поправочного сигнала, вводимого в систему, и уникального для каждой скорости. Для формирования фильтра зафиксированы сигналы на силоизмерительных датчиках, отличные от нуля при различной скорости движения конвейерной ленты [9, 10]. В зависимости от той или иной скорости конвейерной ленты сигнал, поступающий от силоизмерительных датчиков, корректировали на величину, зафиксированную в адаптивном фильтре. Эксперименты проводили на выбранном диапазоне скоростей от 0,3 до 0,8 м/с. Результаты экспериментов при отработке адаптивного фильтра сведены в табл. 2 и графически представлены на рис. 5. Ошибку дозирования при ис-

Таблица 1

Зависимость относительной погрешности измерений от процента подачи сыпучего материала и скорости конвейерной ленты

Скорость ленты, м/с	Подача сыпучего материала, %					
	10	15	20	25	35	50
2,00	81,27	33,84	42,57	66,40	48,95	69,08
1,50	71,52	19,86	11,71	17,96	20,96	17,66
1,00	36,07	1,680	8,290	7,600	13,83	8,230
0,75	24,21	2,760	1,450	3,300	4,400	5,490
0,50	13,41	0,590	2,400	2,120	1,150	3,530
0,25	8,100	6,850	7,190	6,780	7,270	6,220
0,10	7,080	6,020	7,150	6,010	7,380	6,350

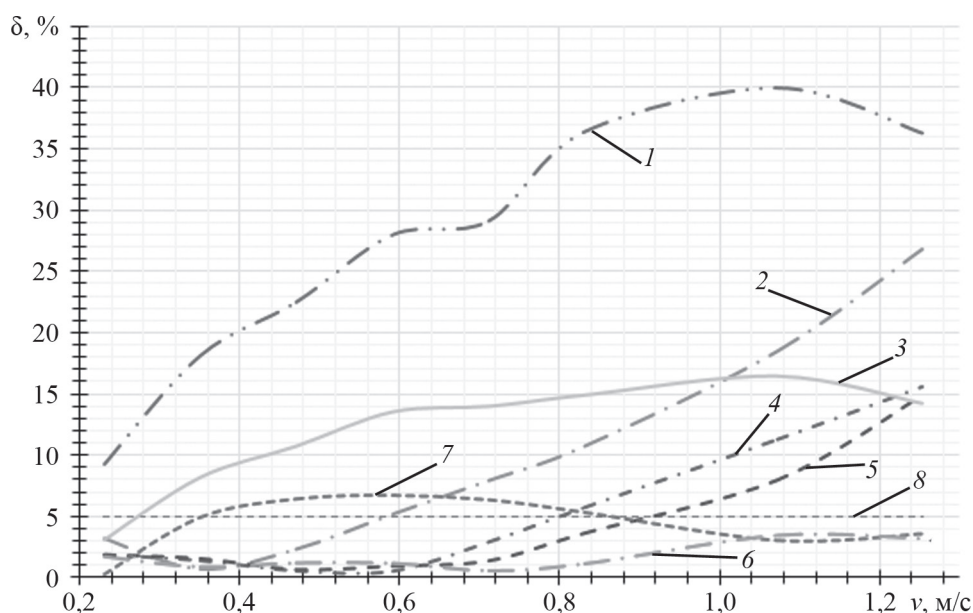


Рис. 3. Зависимость относительной погрешности измерений от скорости конвейерной ленты при изменении частоты вычислений: 1 — 800 мс; 2 — максимальная частота вычислений; 3 — 400 мс; 4 — 50 мс; 5 — 100 мс; 6 — переменная частота вычислений; 7 — 200 мс; 8 — предел допустимой погрешности

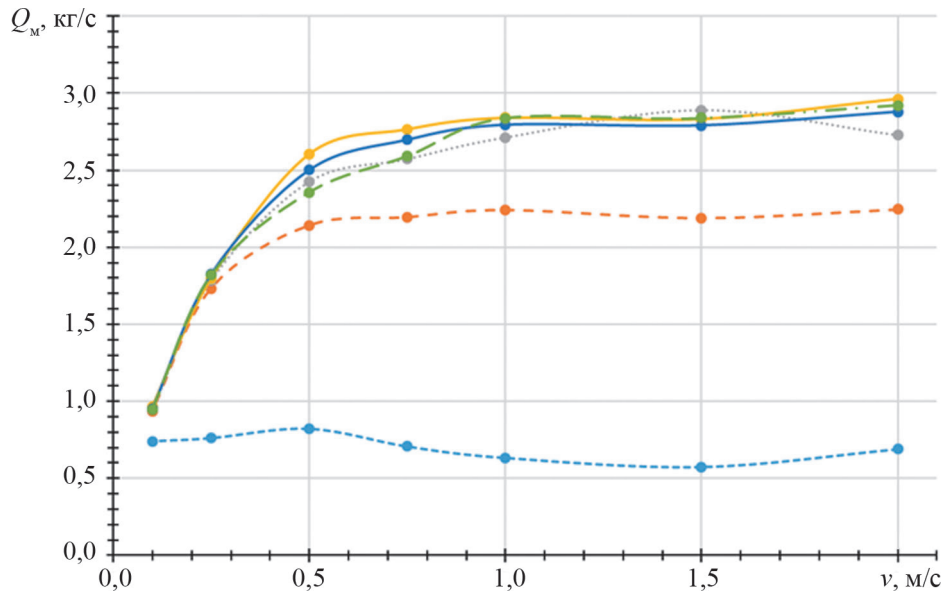


Рис. 4. Зависимость массового расхода от скорости движения конвейерной ленты:

● — 10%; ● — 15%; ● — 20%; ● — 25%; ● — 35%; ● — 50%

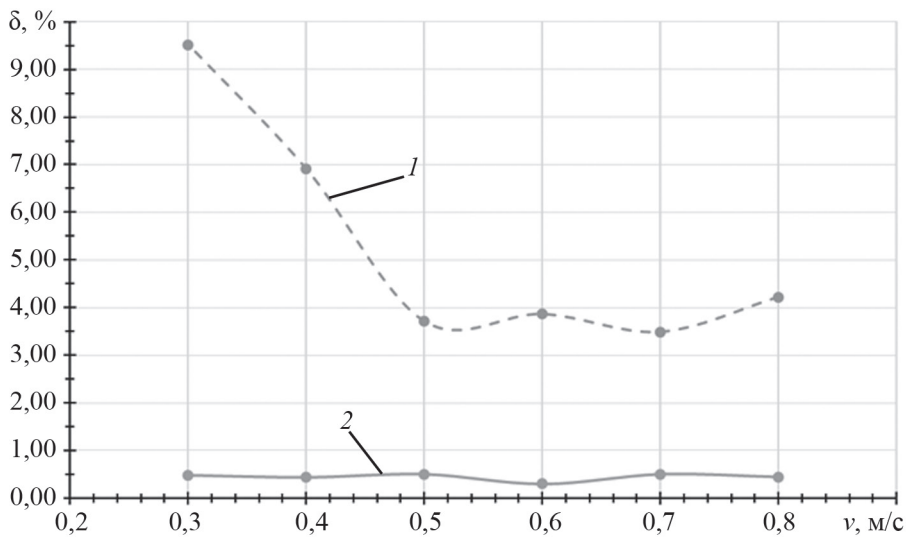


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности от скорости движения конвейерной ленты с адаптивным фильтром (2) и без него (1)

Таблица 2

Зависимость относительной погрешности измерений без и с адаптивной фильтрацией от скорости движения конвейерной ленты

Скорость ленты, м/с	Адаптивная фильтрация	
	выключена	включена
0,8	4,22	0,44
0,7	3,49	0,50
0,6	3,87	0,30
0,5	3,71	0,50
0,4	6,91	0,43
0,3	9,52	0,48

пользовании адаптивного фильтра удалось снизить до 0,5%.

Поставлен эксперимент при переменной подачи сыпучего материала на конвейерную ленту, результаты изображены на рис. 6. Отчетливо видно, что при изменении подачи сыпучего материала в меньшую сторону снижается скорость движения конвейерной ленты, а при увеличении — соответственно, растет. Относительная погрешность при этом составляет менее 0,5%.

Заключение

Распределение взвешиваемого материала вдоль оси взвешивания не оказывает существенного воздействия на ошибку измерения. Влияние неравномерности размещения материала на конвейерной ленте полностью

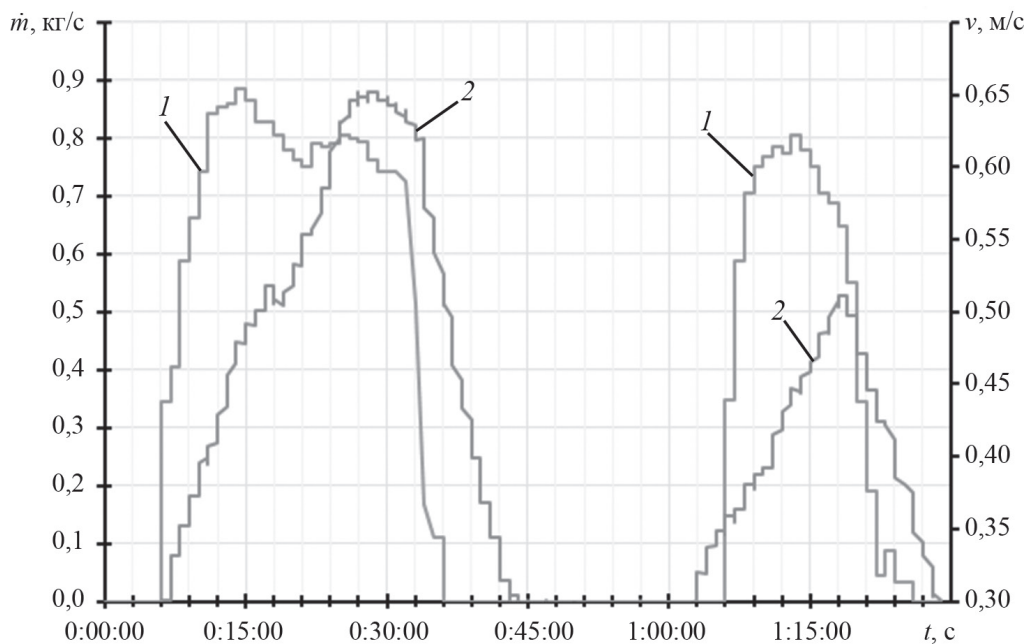


Рис. 6. Зависимости подачи сыпучего материала (1) на конвейерную ленту и скорости конвейерной ленты (2) от времени t

исключено конструкционным исполнением поточного расходомера-дозатора, а именно одновременным анализом показаний двух тензометрических датчиков. Подавать материал на конвейерную ленту необходимо строго на ось взвешивания, при его смещении значительно искажаются показания датчиков, что сказывается на точности взвешивания.

При проведении эксперимента с сыпучими грузами с увеличением скорости конвейерной ленты также растет ошибка измерения. Так, при скорости конвейерной ленты менее 0,25 и более 0,80 м/с, она превышает допустимое значение. Это обусловлено, в первую очередь, оказываемым динамическим воздействием движущихся механических частей устройства (валов электрического двигателя и конвейера, ременной передачи и др.).

Результаты экспериментов показывают, что при помощи адаптивной фильтрации сигналов с силоизмерительных датчиков удалось снизить относительную

ошибку измерения до 0,5% на всем рассматриваемом скоростном диапазоне работы конвейерной ленты.

Итоги исследования определения оптимальной скорости движения конвейерной ленты демонстрируют, что при подаче сыпучего материала в 20% и более от максимально возможного и изменении скорости движения конвейерной ленты массовый расход остается неизменным. Это говорит о том, адаптивная корректировка скорости на базе фаззи-регулятора может воздействовать на результаты дозирования только при малой подаче сыпучих материалов.

Испытания ПРД наглядно показали адекватную работу фаззи-регулятора скорости. При изменении подачи сыпучего материала в меньшую сторону снижалась скорость движения конвейерной ленты, а при увеличении — увеличивалась. Относительная погрешность при автономной работе алгоритма взвешивания на ПРД составила менее 0,5%.

Литература

1. Першина С.В., Каталымов А.В., Однолько В.Г., Першин В.Ф. Весовое дозирование зернистых материалов. М.: Машиностроение, 2009.
2. Шестов Д.А. Анализ процессов дозирования и взвешивания сыпучих материалов // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: Труды Международ. науч.-техн. конф. 2012. Т. 3. С. 109—115.
3. Шестов Д.А. Учетно-дозирующая система управления электрифицированным технологическим процессом приготовления кормосмесей // Там же. Т. 5. С. 110—115.

References

1. Pershina S.V., Katalymov A.V., Odnol'ko V.G., Pershin V.F. Vesovoe Dozirovanie Zernistykh Materialov. M.: Mashinostroenie, 2009. (in Russian).
2. Shestov D.A. Analiz Protssessov Dozirovaniya i Vzveshivaniya Sypuchikh Materialov. Energoobespechenie i Energoberezhnie v Sel'skom Khozyaystve: Trudy Mezh-dunar. Nauch.-tekhn. Konf. 2012;3:109—115. (in Russian).
3. Shestov D.A. Uchetno-doziruyushchaya Sistema Upravleniya Elektrifitsirovannym Tekhnologicheskim Protssesom Prigotovleniya Kormosmesey. Tam zhe;5: 110—115. (in Russian).

4. **Siemens.** Weighing and Feeding Guide. Operation Manual [Официальный сайт] www.siemens.com (дата обращения 14.07.2018).

5. **Agg-net.** Load-Out And Dosing Control Systems. Operation manual [Официальный сайт] www.agg-net.com (дата обращения 14.07.2018).

6. **In-Jae Kang, Joon Ho Kwon, Sung-Min Moon, Daehie Hong.** A Control System Using Butterworth Filter for Loss-in-Weight Feeders // J. Korean Soc. Precision Eng. 2014. V. 31. No. 10. Pp. 905—911.

7. **Siva Vardhan D.S.V., Yeole Sh.** Development of an Automatic Monitoring and Control System for the Objects on the Conveyor Belt // Proc. Intern. Conf. Man and Machine Interfacing. 2015. V. 12. Pp. 1—10.

8. **Aleksandrović S., Damjanović V.** Volume Flow Measurement of Bulk Solids on Conveyor Belts // Intern. J. Transport and Logistics. 2013. Iss. 27. Pp. 1—4.

9. **SICK Bulkscan.** Volume Flow Measurement of Bulk Material on Conveyor Belts. Operation Manual. Bristol, 2001.

10. **Haußecker H., Geißler P.** Handbook of Computer Vision and Applications. San Diego: Academic press, 1999.

4. **Siemens.** Weighing and Feeding Guide. Operation Manual [Официальный сайт] www.siemens.com (дата обращения 14.07.2018).

5. **Agg-net.** Load-Out And Dosing Control Systems. Operation manual [Официальный сайт] www.agg-net.com (дата обращения 14.07.2018).

6. **In-Jae Kang, Joon Ho Kwon, Sung-Min Moon, Daehie Hong.** A Control System Using Butterworth Filter for Loss-in-Weight Feeders. J. Korean Soc. Precision Eng. 2014;31;10:905—911.

7. **Siva Vardhan D.S.V., Yeole Sh.** Development of an Automatic Monitoring and Control System for the Objects on the Conveyor Belt. Proc. Intern. Conf. Man and Machine Interfacing. 2015;12:1—10.

8. **Aleksandrović S., Damjanović V.** Volume Flow Measurement of Bulk Solids on Conveyor Belts. Intern. J. Transport and Logistics. 2013;27:1—4.

9. **SICK Bulkscan.** Volume Flow Measurement of Bulk Material on Conveyor Belts. Operation Manual. Bristol, 2001.

10. **Haußecker H., Geißler P.** Handbook of Computer Vision and Applications. San Diego: Academic press, 1999.

Сведения об авторах:

Шилин Денис Викторович — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры управления и информатики НИУ «МЭИ», e-mail: deninfo@mail.ru

Шестов Дмитрий Александрович — ведущий инженер кафедры управления и информатики НИУ «МЭИ», e-mail: shestov.d.a@gmail.com

Ганин Павел Евгеньевич — аспирант, ведущий инженер кафедры управления и информатики НИУ «МЭИ», e-mail: skaz04nik@bk.ru

Information about authors:

Shilin Denis V. — Ph.D. (Techn.), Senior Lecturer of Control and Informatics Dept., NRU MPEI, e-mail: deninfo@mail.ru

Shestov Dmitriy A. — Leading Engineer of Control and Informatics Dept., NRU MPEI, e-mail: shestov.d.a@gmail.com

Ganin Pavel E. — Ph.D.-student, Leading Engineer of Control and Informatics Dept., NRU MPEI, e-mail: skaz04nik@bk.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 15.08.2018

The article received to the editor: 15.08.2018