

#### Литература

1. Льюинг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
2. Бессонов А.А., Загашвили Ю.В., Маркелов А.С. Методы и средства идентификации динамических объектов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 280 с.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд. исправ. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
4. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач и их приложения к обратным задачам теплообмена. – М.: Наука, 1988. – 288 с.
5. Райбман Н.С., Чадеев В.М. Построение моделей процессов производства. – М.: Энергия, 1975. – 375 с.
6. Типовые линейные модели объектов управления / С.А. Анисимов, И.С. Зайцева, Н.С. Райбман, А.А. Яралов / Под ред. Н.С. Райбмана. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.
7. Бессонов А.А., Загашвили Ю.В. Аналитический метод построения таблиц типовой идентификации // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1980. – № 4. – С. 214.
8. Макаров И.М., Менский Б.М. Таблица обратных преобразований Лапласа и обратных z-преобразований: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 247 с.

УДК 62-52:636.085.6

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПОРЦИОННОГО МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ВЕСОВОГО ДОЗИРОВАНИЯ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ

Дец Д.В., ассистент,

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

*На имитационной модели процесса порционного многокомпонентного весового дозирования проведен сравнительный анализ точности формирования смеси шестью альтернативными вариантами алгоритмов управления. Он позволит целенаправленно выбрать алгоритмы при разработке систем управления такими процессами.*

*On imitative model of portion multicomponent weight dose process the comparative analysis of accuracy of formation of a mix by six alternative variants of control algorithms was carried out. It will allow to choose purposefully algorithms at control system engineering by such processes.*

Ключевые слова: дозирование, процесс, многокомпонентный, весовой, порционный, алгоритм управления.

Процесс многокомпонентного дозирования-смешивания является базовым во многих отраслях промышленности (производство строительных материалов, металлургической, комбикормовой и др.). Соответствие, получаемой в его ходе смеси, заданному рецепту в самой существенной степени определяет качество готовой продукции, ее себестоимость и конкурентоспособность. Реализовать необходимую степень этого соответствия призваны алгоритмы управления процессом, реализуемые средствами автоматизации, которыми оснащаются комплексы дозирования.

На сегодняшний день ситуация в рассматриваемой области характеризуется следующими важными моментами.

1. Количество компонентов в смесях растет, в том числе, за счет дорогих добавок, передозировка или неравномерное распределение которых в смеси может резко ухудшить ее свойства или, в комбикормовой промышленности, – сделать смесь токсичной. Это предопределяет непрерывное повышение требований к качеству процесса дозирования.

2. Стремясь повысить точность формирования смеси, предприятия вкладывают средства в модернизацию дозаторов. Она, как правило, связана с использованием в них измерительных средств более высокого класса точности, прежде всего тензометрических и (или) более совершенных, на их взгляд, алгоритмов автоматического управления процессом, прежде всего, с «коррекцией досыпки».

3. Контроль качества готовой смеси по объективным показателям весьма затруднителен. При этом такой контроль может лишь констатировать фактические значения показателей качества, но на этом этапе изменить

их уже невозможно.

4. Как в промышленности в целом, так и для управления процессами дозирования все более широко распространяются контроллеры и компьютеры, на базе которых, в принципе, могут реализовать алгоритм управления любого интеллектуального уровня.

Таким образом, производители комбикормов, стремясь получить высококачественный продукт, объективно нуждаются в повышении точности дозирования, а существующие программно-технические средства, которые могут быть использованы в системах автоматического управления дозаторами, создают для этого материальную основу. Казалось бы, в таких условиях, эта проблема давно должна быть решена, по крайней мере, на тех предприятиях, где используются средства вычислительной техники и тензометрия. Но практика показывает, что она сохраняется и после модернизации систем.

Удобства, которые позволяют создать оператору процесса дозирования современные средства отображения информации, безусловно, важное преимущество модернизированных систем. Повышение точности измерения массы, если оно фактически достигнуто, при замене рычажной системы измерения на тензометрическую, также является прогрессивным моментом. Но сами по себе оба эти нововведения не способны решить указанную проблему в принципе. Основные причины две.

Первая. В смеси, получаемой в каждом цикле дозирования принципиально важное значение имеет не абсолютное значение измеренной массы каждого компонента, а соотношение их масс. При этом даже если весоизмеритель имеет большую систематическую мультипликативную составляющую погрешности (аддитивная составляющая легко компенсируется ее отнесением к массе тары), то она никак не повлияет на соотношение компонентов и, значит, качество смеси. Использование весоизмерителей более высокой точности даст возможность повысить точность дозирования только за счет уменьшения случайной составляющей погрешности измерения и обеспечить более точный учет массы компонентов, израсходованных на получение смеси. Но это улучшение другой функции – функции учета.

Вторая. Кажущаяся простота процесса формирования смеси провоцирует разработчиков алгоритмов управления процессом дозирования на такие же простые и, казалось бы, совершенно понятные, а, следовательно – не требующие специальных исследований, пути их совершенствования (повышения точности). Основное направление повышения точности – учет значений фактического «пересыпа» («недосыпа») компонентов в текущем цикле дозирования, чтобы в следующем на такую же величину уменьшить (увеличить) заданную массу дозируемого компонента.

Дать объективный ответ на вопрос об эффективности такого совершенствования алгоритмов, а тем более сравнивать алгоритмы между собой и разрабатывать новые, можно только на основе математических имитационных моделей [1] и введения обоснованных оценок качества от дозированной смеси [2]. Ниже приведены перечень структурных схем и краткое описание традиционных алгоритмов (1 – 3) и новых (4 – 6) [3], более «интеллектуально продвинутых», которые были отобраны для сравнительного анализа.

1. Алгоритм с заданным, фиксированным для всех циклов, законом изменения суммарной массы весоизмерительного бункера. Структурная схема САУ с таким алгоритмом приведена на рис. 1. Характерный прототип такого алгоритма – дозатор с рычажным весоизмерительным механизмом и циферблатной головкой, по окружности которой устанавливаются датчики положения стрелки. При срабатывании этих датчиков выдаются команды на останов приводов питателей.

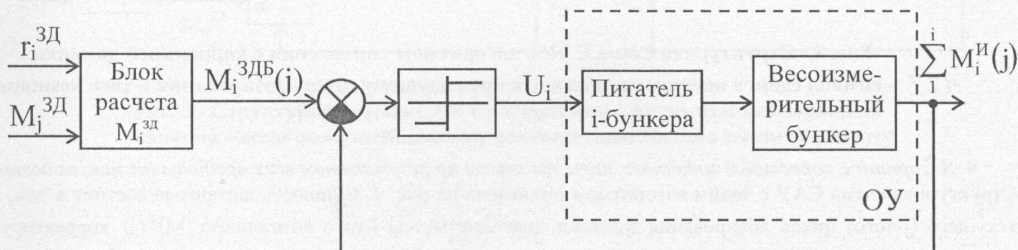


Рис. 1 - Структурная схема САУ с алгоритмом с заданным, фиксированным для всех циклов, законом изменения суммарной массы весоизмерительного бункера

2. Алгоритм управления с заданными, фиксированным для всех циклов, значениями масс дозируемых компонентов. Структурная схема САУ с таким алгоритмом приведена на рис. 2. Является одним из широко распространенных простейших алгоритмов, реализуемый, например, в КДК.



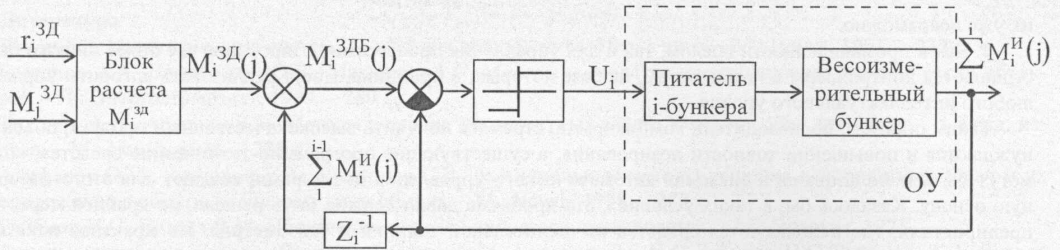


Рис. 2 - Структурная схема САУ с алгоритмом управления с заданными, фиксированным для всех циклов, значениями масс дозируемых компонентов ( $Z_i^{-1}$  – символ сдвига информации назад, к измерению массы  $(i - 1)$  компонента.

По смыслу он соответствует символу сдвига, используемому в Z-преобразовании Лапласа)

3. Алгоритм управления с заданными значениями масс дозируемых компонентов, корректируемых для каждого последующего цикла на величину погрешности их дозирования в предыдущем цикле (с коррекцией досыпки). Структурная схема САУ с таким алгоритмом приведена на рис. 3. Сущность алгоритма состоит в том, что для текущего  $(j)$ -го цикла дозирования заданное значение массы  $i$ -го компонента  $M_i^{ЗД}(j)$  корректируется на величину ошибки дозирования  $\Delta M_i(j-1) = M_i^{ЗД}(j-1) - M_i^H(j-1)$  в предыдущем  $(j-1)$  цикле. При этом обеспечивается упреждение или запаздывание на отключение питателя. Величина упреждения (запаздывания) в данном случае будет соответствовать величине передозировки (недозировки) в предыдущем цикле дозирования  $i$ -го компонента.

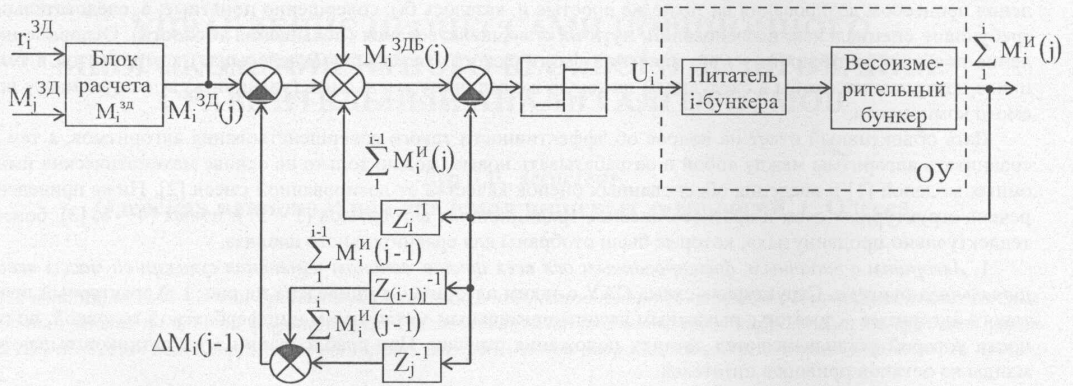


Рис. 3 - Структурная схема САУ с алгоритмом управления с коррекцией досыпки ( $Z_i^{-1}$  – символ сдвига информации назад, к предыдущему циклу дозирования  $i$ -го компонента)

4. Алгоритм с коррекцией заданного значения массы по результатам всех предыдущих циклов дозирования. Структурная схема САУ с таким алгоритмом приведена на рис. 4. Сущность алгоритма состоит в том, что для текущего  $(j)$ -го цикла дозирования заданное значение массы  $i$ -го компонента  $M_i^{ЗД}(j)$  корректируется на величину ошибки дозирования во всех предыдущих циклах:

$$M_i^{ЗДБ}(j) = M_i^{ЗД} + \Delta M_{ij}^H(j) + \Delta M_{ij}^H(j); \quad (1)$$

$$M_i^{ЗД} = r_i^{ЗД} M^C, \quad (2)$$

где  $r_i^{ЗД}$  – заданная доля  $i$ -го компонента в смеси;  
 $M^C$  – масса смеси для  $i$ -го цикла дозирования.

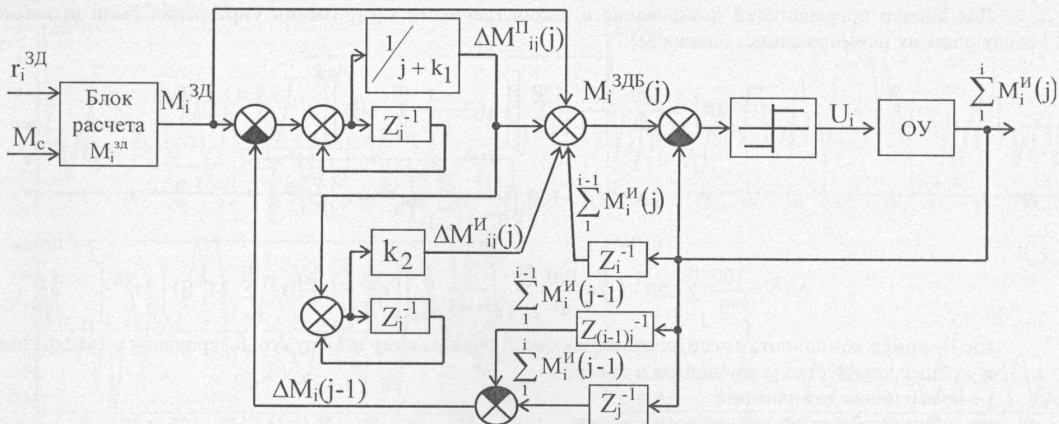


Рис. 4 - Структурная схема САУ с алгоритмом с коррекцией заданного значения массы по результатам всех предыдущих циклов дозирования ( $k_1, k_2$  – настроечные параметры алгоритма)

5. Алгоритм с оптимизацией заданного значения массы по максимальному соответствию состава смеси её рецепту. Структурная схема САУ с таким алгоритмом приведена на рис. 5. Сущность алгоритма управления состоит в расчете заданных значений массы  $i$ -того компонента с учетом уже отдозированных компонентов, причем для компонента, который дозируется первым, заданное значение его массы остается неизменным и определяется из выражения (3). Заданные значения масс последующих компонентов определяются с помощью процедуры оптимизации (4), минимизирующей для каждого последующего цикла дозирования возможную ошибку соотношения компонентов в смеси.

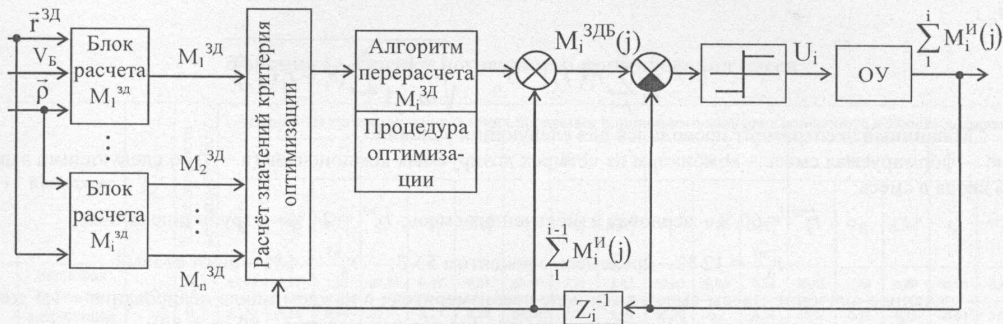


Рис. 5 - Структурная схема САУ с алгоритмом с оптимизацией заданного значения массы по максимальному соответствию состава смеси её рецепту

$$M_i^{CA} = M^C \frac{r_i^{CA}}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i^{CA}}{r_i^{CA} \cdot \rho_i}}, \quad (3)$$

где  $\rho_i$  – объемная масса (плотность)  $i$ -того компонента.

$$M_i^{3Д}(j) = \operatorname{argmin} \left\{ \left| \sum_{i=1}^{i-1} \left| 1 - \frac{M_i^II(j)}{\frac{r_i^{3Д}}{100} \left( \sum_{i=1}^{i-1} M_i^II(j) + \sum_{i=1}^n M_i^{3Д}(j) \right)} \right| + \sum_{i=1}^n \left| 1 - \frac{M_i^{3Д}(j)}{\frac{r_i^{3Д}}{100} \left( \sum_{i=1}^{i-1} M_i^II(j) + \sum_{i=1}^n M_i^{3Д}(j) \right)} \right| \right\}. \quad (4)$$

6. Совместное использование алгоритмов с коррекцией заданного значения массы по результатам всех предыдущих циклов дозирования и оптимизацией. Суть алгоритма состоит в том, что для текущего цикла дозирования заданное значение массы  $i$ -того компонента определяется процедурой оптимизации с учетом уже отдозированных компонентов, после чего корректируется по ошибке дозирования во всех предыдущих циклах.

Для оценки погрешностей дозирования с рассмотренными алгоритмами управления были использованы следующие их нормированные оценки [2]:

$$\Delta R_i^j = \frac{100}{r_i^{\text{сд}}} \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m \left[ r_i(j) - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m r_i(j) \right]^2}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}; \quad (5)$$

$$\Delta R^i(j) = 100 \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{r_i^{\text{сд}}}{r_i^{\text{сд}}} - r_i \right) / r_i^{\text{сд}} \right]^2}, \quad i = \overline{1, n}; \quad (6)$$

$$\Delta R^i = \frac{100}{m} \sum_{j=1}^m \Delta R^i(j) = \frac{100}{m} \sum_{j=1}^m \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{r_i^{\text{сд}}}{r_i^{\text{сд}}} - i \right) / \left( \sum_{i=1}^n M_i^{\text{сд}}(j) \right) / r_i^{\text{сд}} \right]^2}, \quad (7)$$

где  $i$  – номер компонента смеси, соответствующий порядковому номеру его дозирования в каждом цикле;

$n$  – общее количество компонентов в смеси;

$j$  – номер цикла дозирования;

$m$  – общее количество циклов дозирования;

$r_i^{\text{сд}}$ ,  $r_i$  – соответственно заданное и фактическое значения соотношения  $i$ -того компонента в смеси;

$\Delta R_i^j$  – нормированная относительно  $r_i^{\text{сд}}$  и выраженная в %, оценка среднеквадратической погрешности дозирования  $i$ -того компонента, полученная усреднением по всем « $m$ » циклам дозирования;

$\Delta R^i(j)$  – выраженная в % оценка среднеквадратической погрешности формирования фактических соотношений  $r_i$ , нормированных относительно их заданных значений  $r_i^{\text{сд}}$ , полученная усреднением по всем « $n$ » компонентам для  $j$ -того цикла дозирования;

$\Delta R^i$  – то же, что  $\Delta R^i(j)$ , но усредненная по всем циклам дозирования, т.е. обобщенная оценка погрешности дозирования.

При сравнительном анализе качества дозирования представляют также интерес, давая дополнительную наглядность результатам, следующие осредненные по всем « $m$ » циклам дозирования значения: средней фактической концентрации каждого  $i$ -того компонента смеси  $\bar{r}_i$  и соответствующего среднеквадратического отклонения  $\sigma_{r_i}$ :

$$\bar{r}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m r_i(j); \quad \sigma_{r_i} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\bar{r}_i - r_i(j))^2}. \quad (8)$$

Машинный эксперимент проводился для следующих условий:

– формируемая смесь – комбикорм из четырех дозируемых компонентов ( $n = 4$ ) со следующими заданными % ввода в смесь:

$r_1^{\text{зд}} = 60\%$  – зерновая измельченная смесь;  $r_2^{\text{зд}} = 24\%$  – отруби пшеничные;

$r_3^{\text{зд}} = 12\%$  – предсмесь с рецептом 55-3;  $r_4^{\text{зд}} = 4\%$  – шрот соевый;

– заданное значение массы смеси в бункере весоизмерителя в каждом цикле дозирования  $\approx 1,5$  тонны, общая масса формируемой смеси  $\approx 120$  тонн, количество циклов дозирования – 80 ( $m = 80$ );

– характеристики механической части весоизмерителя соответствуют комплексу дозирования 10ДК-2500М с диапазоном измерения массы 2500 кг;

– длина всех самотеков принята одинаковой и равной трем метрам;

– класс точности весоизмерительного устройства (максимальная приведенная к диапазону измерения погрешность) – 0,5 % и 0,1 %.

Результаты эксперимента, перерассчитанные в показатели (5) – (8) отражены на рис. 6 и в табл. 1.



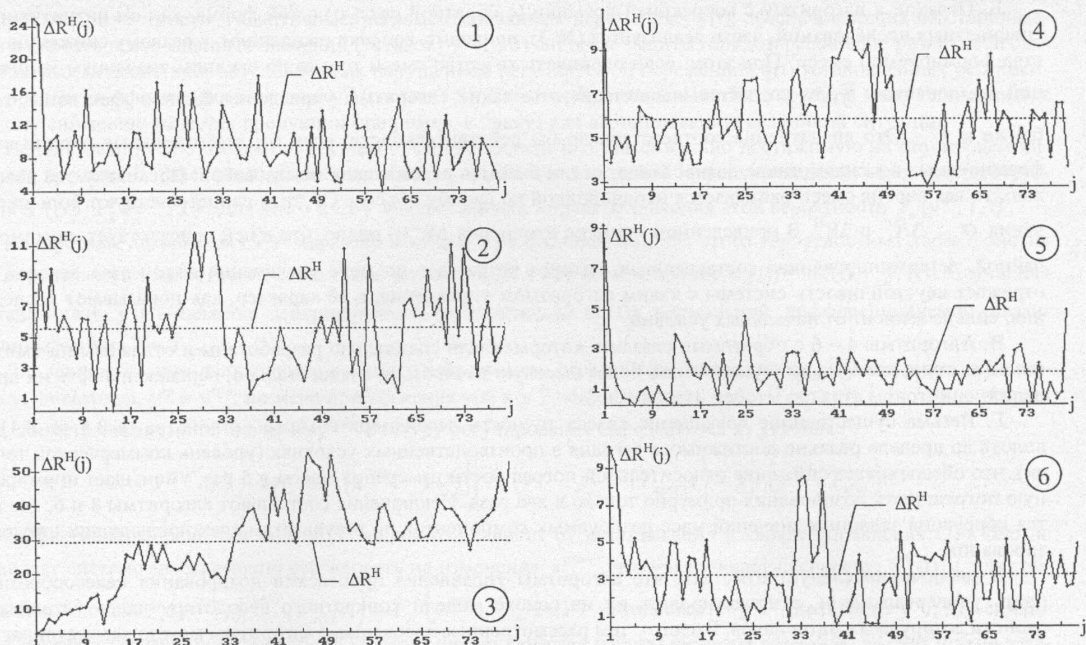


Рис. 6 – Иллюстрация изменения нормированных погрешностей процесса дозирования  $\Delta R^H(j)$  и  $\Delta R^H$  при его моделировании с различными алгоритмами управления (их номера указаны в поле графика)

Таблица 1 – Оценки погрешности формирования смеси

i	Компонент	$r_i^{зд}, \%$	Класс точности весомизмерителя	Варианты алгоритмов управления процессом порционного многокомпонентного весового дозирования																		
				№ 1			№ 2			№ 3			№ 4			№ 5			№ 6			
				$\bar{r}_i$	$\sigma_{r_i}$	$\Delta R_i^H$	$\bar{r}_i$	$\sigma_{r_i}$	$\Delta R_i^H$	$\bar{r}_i$	$\sigma_{r_i}$	$\Delta R_i^H$	$\bar{r}_i$	$\sigma_{r_i}$	$\Delta R_i^H$	$\bar{r}_i$	$\sigma_{r_i}$	$\Delta R_i^H$	$\bar{r}_i$	$\sigma_{r_i}$	$\Delta R_i^H$	
1	Зерновая смесь из-мельченная	60	0,5	62,09	0,61	1,02	60,84	0,49	0,81	60,40	2,31	3,85	60,00	0,56	0,94	60,42	0,48	0,80	60,05	0,48	0,80	
				0,1	62,10	0,28	0,46	60,25	0,17	0,28	60,06	1,26	2,09	60,00	0,2	0,34	60,33	0,20	0,33	60,01	0,24	0,40
2	Отруби пшеничные	24	0,5	26,12	0,69	2,89	24,38	0,38	1,57	24,23	2,02	8,40	24,00	0,41	1,71	24,31	0,38	1,58	24,01	0,34	1,44	
				0,1	25,92	0,30	1,25	24,31	0,12	0,49	24,12	0,79	3,30	24,00	0,14	0,6	24,12	0,13	0,56	24,00	0,14	0,58
3	Предсмесь 55-3	12	0,5	12,02	0,63	5,23	12,30	0,37	3,10	12,08	2,38	19,73	12,00	0,42	3,47	12,08	0,29	2,41	12,20	0,39	3,23	
				0,1	12,23	0,16	1,28	12,08	0,11	0,90	12,04	0,57	4,76	12,00	0,12	1,03	12,09	0,12	0,98	12,06	0,15	1,27
4	Шрот соевый	4	0,5	4,00	0,65	16,26	4,16	0,41	10,11	4,08	2,10	52,45	4,00	0,49	12,23	4,03	0,19	4,80	3,84	0,25	6,31	
				0,1	3,95	0,15	3,85	3,86	0,13	3,22	3,89	0,89	18,34	4,00	0,15	3,73	4,12	0,09	2,26	3,95	0,08	1,96
Оценка обобщенной погрешности формирования смеси				0,5	$\Delta R^H = 9,05$			$\Delta R^H = 5,43$			$\Delta R^H = 25,51$			$\Delta R^H = 5,47$			$\Delta R^H = 2,63$			$\Delta R^H = 3,33$		
				0,1	$\Delta R^H = 5,12$			$\Delta R^H = 2,31$			$\Delta R^H = 10,91$			$\Delta R^H = 1,65$			$\Delta R^H = 1,88$			$\Delta R^H = 1,09$		

В табл. 1 результаты моделирования процессов дозирования, перерасчитанные в показатели (5) – (8) с рассмотренными вариантами алгоритмов управления представлены графиками изменения нормированной погрешности  $\Delta R^H(j)$  по всем циклам дозирования и для остальных показателей. Анализ результатов моделирования (подчеркнем, что здесь представлены только их фрагменты), показывает:

А. Переход от алгоритмов управления с фиксированной («жесткой») для всех циклов дозирования программой отключения питателей (№ 1) к алгоритмам которые учитывают фактическое (близкое к фактическому) отдозированное значение массы предыдущего компонента (№ 2) повысило качество формирования смеси. Это проявляется в приближении средних значений концентрации в смеси всех компонентов  $\bar{r}_i$  к  $r_i^{зд}$ , уменьшении «разброса»  $r_i(j)$  от  $r_i^{зд}$ , т.е. уменьшения  $\sigma_{r_i}$  и  $\Delta R_i^H$ . В итоге оценка обобщенной погрешности  $\Delta R^H$  снижается примерно в 2 раза.

Б. Переход к алгоритму с коррекцией досыпки (с обратной связью) в той форме, как он интуитивно, без специальных исследований, часто реализуется (№ 3), приводит, вопреки ожиданиям, к резкому снижению качества формируемой смеси. При этом, если оценивать качество смеси только по средним значениям концентраций компонентов  $\bar{r}_i$ , то создаётся впечатление, что такие алгоритмы управления более эффективны, т.к.  $\bar{r}_i$  ближе к  $r_i^{30}$ . Это впечатление соответствовало бы действительности, если бы все отдельные порции смеси, формируемые в каждом цикле дозирования, могли бы быть перемешаны между собой. Поскольку это невозможно, то вся партия смеси оказывается неоднородной по своему объёму. Об этом свидетельствуют большие значения  $\sigma_{r_i}$ ,  $\Delta R_i''$  и  $\Delta R^H$ . В приведенном примере изменения  $\Delta R^H(j)$  видно, что в ней присутствует, помимо случайной, детерминированная составляющая, которая возрастает по мере увеличения количества отвесов. Она отражает неустойчивость системы с таким алгоритмом управления, а её характер, как показывают исследования, сильно зависит от начальных условий.

В. Алгоритмы 4 – 6 с обратными связями, которые были специально разработаны и отлажены на имитационной модели, показывают существенно более высокую точность и, следовательно, перспективность их применения.

Г. Весьма существенное повышение класса точности весоизмерительного устройства (с 0,5 до 0,1), т.е. вплоть до предела реально достижимого сегодня в производственных условиях (уровень коммерческой точности), что обеспечивает снижение относительной погрешности измерения массы в 5 раз, уменьшает нормированную погрешность дозирования примерно только в два раза. Исключение составляют алгоритмы 4 и 6, где ведется коррекция заданных значений масс дозируемых компонентов по результатам всех предыдущих циклов дозирования.

В заключении следует отметить, что алгоритмы управления процессами дозирования целесообразно не брать универсальными, а проектировать их на основе модели конкретного весодозирующего устройства и свойств дозируемых материалов. Вместе с тем рассмотренные здесь новые алгоритмы можно рассматривать как базовые для проектирования систем порционного весового дозирования максимально достижимой точности.

#### Литература

1. Хобин В.А., Дец Д.В. Имитационная математическая модель многокомпонентного весового дозатора периодического действия / Наук. пр. ОНАХТ / Міністерство освіти України. – Одеса: 2003. – Вип. 26. – С. 171 – 177.
2. Хобин В.А., Дец Д.В. Автоматизация процессов порционного многокомпонентного весового дозирования: проблемы, пути решения, перспективы / Зернові продукти і комбикорми. – Одеса, 2002. № 2. – С. 49 – 56.
3. Хобин В.А., Дец Д.В. Алгоритмические методы повышения точности дозирования / Наук. пр. ОДАХТ / Міністерство освіти України. – Одеса: 2002. – Вип. 24: Присвячується 100-річчю з дня заснування ОДАХТ. – С. 391 – 396.

УДК 681.50

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННОГО ДВИЖЕНИЯ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В СИСТЕМАХ ГАРАНТИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

Хобин В.А., д-р техн. наук, профессор  
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса  
Степанов М.Т., канд. техн. наук, доцент,  
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

*Для систем гарантирующего управления приводятся алгоритмы прогнозирования составляющих их вынужденного движения, основанные на гармоническом и кубическом сплайнах. Рассматривается точность алгоритмов прогнозирования и эффективность их использования в системах гарантирующего управления.*

*Prediction algorithms of components of the guaranteeing control systems' forced movement, which are based on the harmonic and cubic splines, are presented. Precision of prediction algorithms and the efficiency of their using in guaranteeing control systems are considered.*

Ключевые слова: прогнозирование, сплайн, система гарантирующего управления.

В [1, 2] рассмотрены задачи, принципы построения и варианты структур систем гарантирующего управления (СГУ). Их назначение состоит в управлении нестационарными, подверженными интенсивным возмущениям, объектами, эффективность функционирования которых возрастает по мере приближения их режимов работы к предельно допустимым.

Системы автоматического управления (САУ) такими объектами включают в себя: а) системы (контура) ре-