

1. Подъемно-транспортные и погрузочно-разгрузочные устройства // Платонов П.Н., Куценко К.И. Изд. 2-е, перераб. и доп. – «Колос», М., 1972.
2. Подъемно-транспортные машины // Фиделев А.С. Изд. объедин. «Вища школа», 1975. – 220 с.
3. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины: Учеб. для машиностроит. спец. вузов. – 6-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1985. – 520 с., ил.
4. Машины непрерывного транспорта // Зеленкой Р.Л., Иванков И.И., Колобов Л.Н. Изд. 2-е, перераб. и доп. – «Машиностроение», М., 1987. – 431 с.

УДК 62-50:621.86.08:636.085.6

КОМПЛЕКСЫ ВЕСОВОГО ДОЗИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ, ЗАДАЧИ И ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ

Хобин В.А., д-р техн. наук, проф., Дец Д.В., ассистент
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Проведен сравнительный анализ базовых технологических схем комплексов весового дозирования и формирования многокомпонентных смесей сыпучих материалов как систем автоматического управления. С позиций повышения точности соответствия формируемой смеси заданному рецепту и ее однородности рассмотрены наиболее важные взаимосвязанные аспекты и проблемы, относящиеся к метрологии измерения массы, функциям и алгоритмам управления, направлениям их совершенствования, критериям оптимизации.

The comparative analysis of basic technological schemes of weight batching complexes and formation of multicomponent mixes of loose materials as automatic control systems is carried out. The most important interconnected aspects and problems which concern to metrology of measurement weight, to functions and management algorithms, to directions of their perfection, to optimization criteria are considered from positions of increase accuracy conformity of a formed mix to the recipe and its uniformity.

Ключевые слова: смеси компонентов, дозирование, варианты технологий, управление, оптимизация.

Введение. Формирование смесей сыпучих материалов является составной частью технологических процессов многих отраслей промышленности: комбикормовой, пищевой, строительных материалов, химической, металлургической и др. [1–6]. Во всех случаях соответствие полученной смеси ее заданному рецепту в самой значительной степени определяет качество готовой продукции, а производительность процесса – заметно влияет на ее себестоимость.

Практика применения комплексов дозирования показывает, что в большинстве случаев рецепт смеси задается, а дозирование осуществляется по величине массы (альтернатива – по объему) входящих в смесь компонентов. Точность измерения масс компонентов является важным, но не единственным фактором, определяющим точность соответствия сформированной смеси ее заданному рецепту. При этом точность и производительность для комплексов весового дозирования являются, в определенной мере, противоречивыми показателями. На этапе предпроектного анализа, при выборе конкретной технологической схемы реализации комплекса, они выступают как основные факторы, определяющие компромисс, на основе которого и принимается решение. Кроме этих двух факторов обычно учитывают стоимость оборудования, удобство компоновки в производственных объемах, характеристики дозируемых материалов (сыпучесть, пыление, гранулометрический состав и др.).

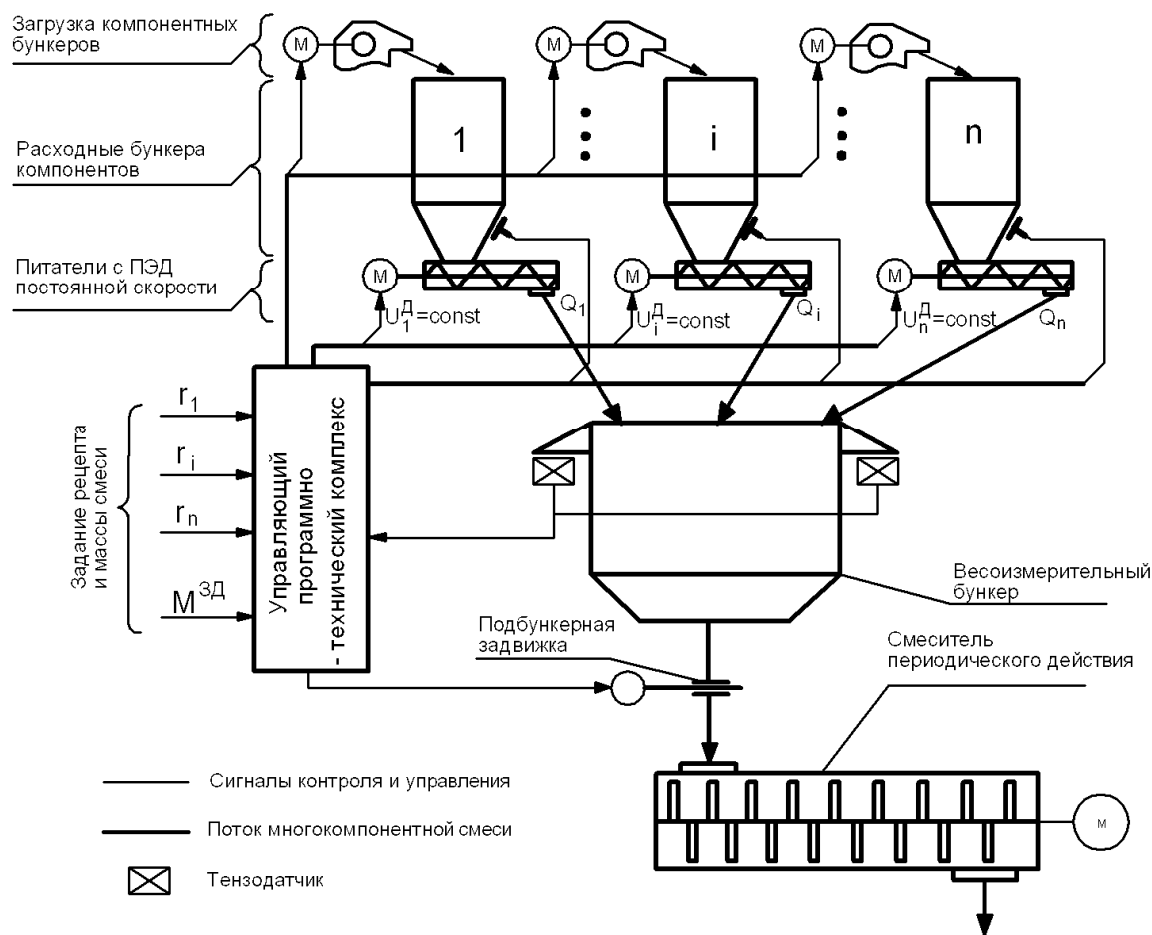
Рассмотрим здесь три варианта технологических схем многокомпонентного дозирования, имеющих широкое распространение в различных отраслях промышленности, компоновку которых можно считать классической (базовой):

- а) порционное дозирование с одним весоизмерительным бункером, который заполняется компонентами смеси из расходных бункеров со шнековыми разгрузителями;
- б) непрерывное дозирование с ленточными весоизмерительными дозаторами с управляемой скоростью ленты и смесителем непрерывного действия;
- в) непрерывное дозирование с весоизмерительными расходными бункерами, имеющими шнековые разгрузители с управляемой скоростью вращения вала.

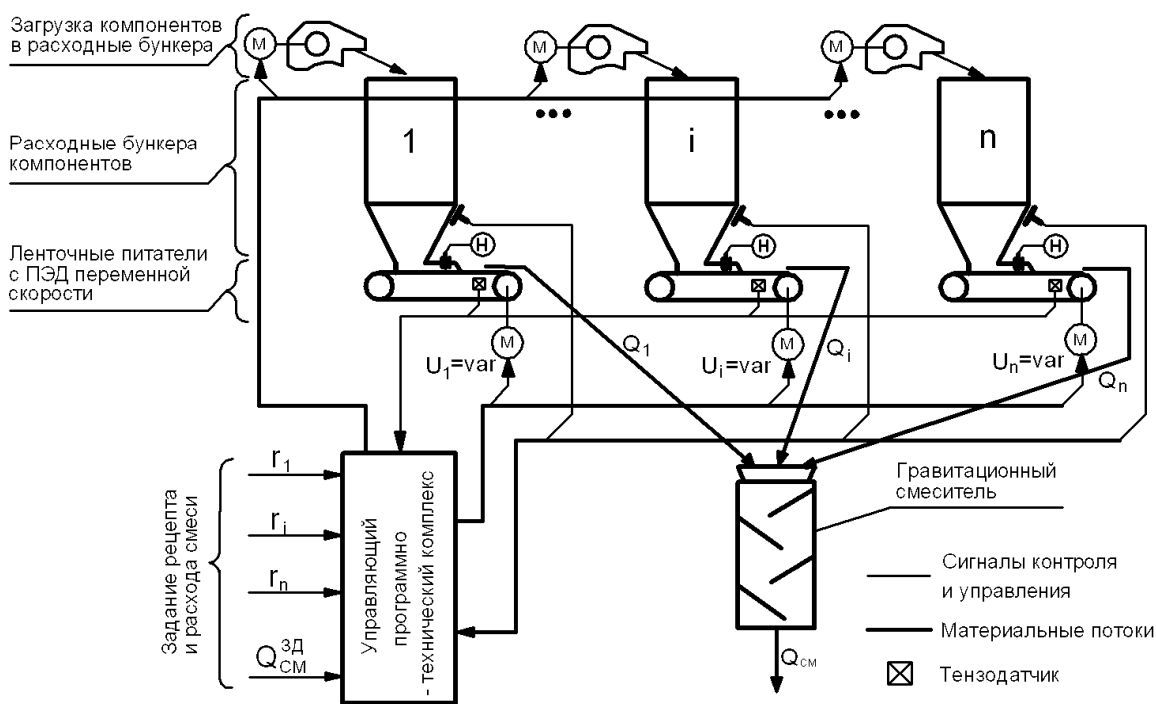
Схемы перечисленных процессов дозирования представлены на рис. 1. Проведем их сравнительный анализ, сделав акцент на проблемах обеспечения качества смеси и повышения производительности (снижения себестоимости) процесса, которые могут эффективно решаться средствами автоматического управления.

Характеристики дозируемых материалов и диапазоны производительности. Все технологические схемы (ТС) ориентированы на дозирование легкосыпучих (невязких, нелипких) слабо абразивных материалов. ТС типов «а» и «в» позволяют дозировать сильно пылящие материалы и материалы с сильно изменяющимся коэффициентом внутреннего трения при механическом возбуждении. ТС типа «б» позволяют дозировать крупнокусковые материалы.

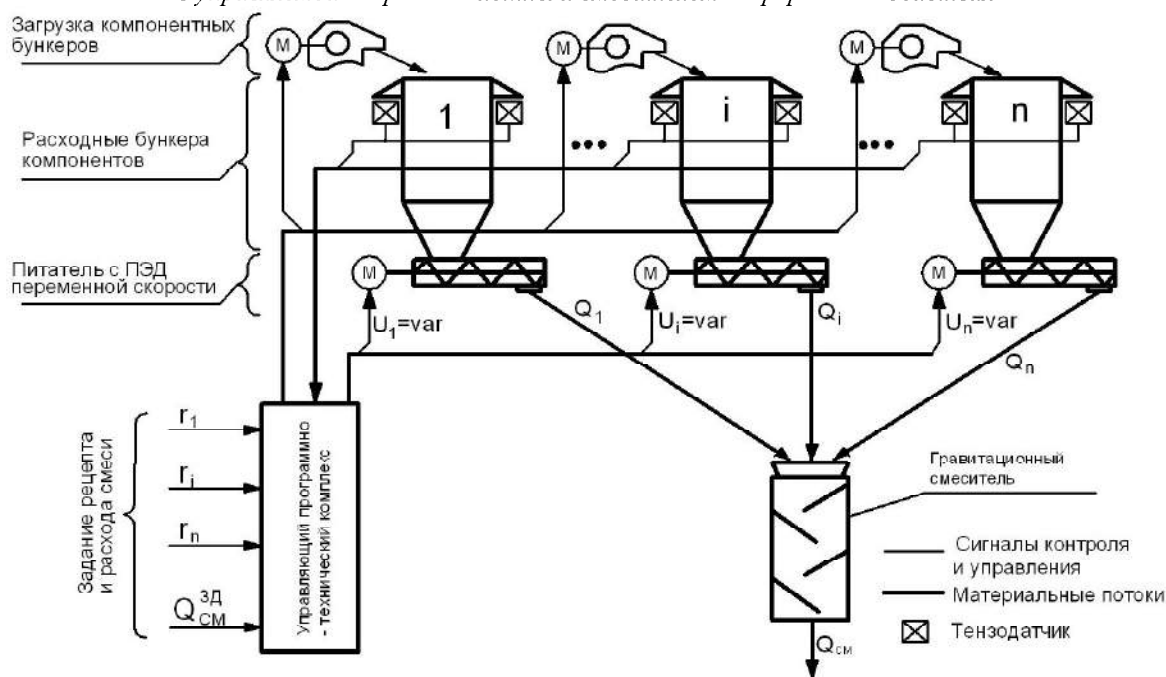
Границы производительности ТС определяются конструктивными особенностями их питателей (разгрузителей). Схемы «а» и «в» применяют для малых и средних производительностей (0,005 ... 50) т/час, схему «б» для средних и высоких производительностей (2 ... 200) т/час (значения производительностей указаны достаточно условно и для отдельных компонентов смеси). Важно подчеркнуть, что ТС типов «а» и «в» позиционируются, как принадлежащие одинаковому диапазону производительностей. Но при одинаковых компоновках этих ТС, одинаковых параметрах разгрузителей их расходных бункеров и при формировании одинаковых смесей, время формирования заданного количества смеси с применением ТС типа «в» будет в несколько раз меньше, чем ТС типа «а» из-за дискретного характера работы последней.



а) порционное дозирование с одним весоизмерительным бункером, который заполняется компонентами смеси из расходных бункеров со шнековыми разгрузителями



б) непрерывное дозирование с ленточными весоизмерительными дозаторами с управляемой скоростью ленты и смесителем непрерывного действия



в) непрерывное дозирование с весоизмерительными расходными бункерами, имеющими шнековые разгрузители с управляемой скоростью вращения вала

Рис. 1 – Базовые варианты ТС комплексов многокомпонентного весового дозирования и смешивания

Практика показывает, что применение непрерывных технологий дозирования позволяет повысить среднее значение суммарной производительности участка смесеприготовления в разы. Характерен пример перевода на непрерывную технологию дозирования по ТС тип «б» предприятий комбикормовой промышленности, который выполнялся в рамках научно-технической программы Государственного комитета по науке и технике СССР 0.42.01 «Зернопродукты» – «Создать и внедрить высокопроизводительные технологические процессы, оборудование и системы автоматизации для технического перевооружения».

ния и реконструкции элеваторной, мукомольной, крупяной и комбикормовой промышленности». Так, на Резекненском комбинате хлебопродуктов Латвийской ССР замена порционного дозирования при производстве комбикормов на непрерывное с применением ленточных дозаторов 4488ДН позволила увеличить объем производства более, чем в два с половиной раза [3].

Качество сформированной смеси. Оно предполагает соответствие сформированной смеси заданному рецепту по двум показателям: а) величине процентного содержания компонентов в смеси; б) однородности их распределения даже в достаточно малых объемах смеси.

При формировании смеси по дискретной технологии (ТС типа «а»), задачи обеспечения точности заданного процентного ввода компонентов и однородности смеси независимы. Первая обеспечивается точностью измерения массы и алгоритмами управления процессом дозирования компонентов в несоизмерительный бункер, вторая – эффективностью конструкции смесителя и временем перемешивания компонентов.

При формировании смеси по непрерывной технологии, и для ТС типа «б» и для ТС типа «в», задачи обеспечения точности заданного процентного ввода компонентов и однородности смеси в весьма существенной степени взаимосвязаны. Это обуславливается тем, что при непрерывном дозировании смеситель должен рассматриваться как динамическая система, преобразующая характеристики расходов непрерывных потоков компонентов смеси в характеристики смеси. Поскольку время пребывания компонентов в смесителе ограничено, то такую динамическую систему можно рассматривать, по крайней мере, в первом приближении, как осреднитель этих характеристик на скользящем интервале времени [6]. Такое представление смесителя легко позволит сделать вывод о том, что качество смешивания будет разным для различных частот колебаний расходов компонентов в смеси. Так, для высокочастотных колебаний расходов качество смешивания будет соответствовать характеристикам смесителя, а для низкочастотных – оно может оказаться существенно ниже. Это объясняется тем, что интервал времени усреднения (перемешивания) будет соизмерим с периодом этих низкочастотных составляющих.

Для ТС типа «б» низкочастотные составляющие колебаний связаны с неравномерностью высоты слоя дозируемого материала, образующегося на несоизмерительной ленте при вытекании из бункера, и неравномерностью распределения массы самой ленты (массы тары) по ее длине. При этом амплитуда низкочастотной составляющей, связанной с изменением высоты слоя материала на ленте может быть значительной только при дозировании крупнокускового материала, а амплитуда колебаний массы ленты по ее длине всегда мала и уменьшается по мере совершенствования техники дозирования.

Для ТС типа «в» наличие низкочастотных составляющих обуславливается конструкцией шнекового разгрузителя (питателя). Здесь низкочастотные составляющие имеют форму квазигармонических колебаний. Их амплитуду в первом приближении ее можно считать равной средней производительности шнекового питателя, а их частота будет обратно пропорциональна заданным значениям расходов по этим компонентам. Т.е., чем ниже расход компонента при прочих равных условиях, тем хуже он перемешивается с другими компонентами. Конечный эффект такого плохого смешивания можно рассматривать как периодически возникающее нарушение заданного процента ввода компонента в смесь. Это подчеркивает для систем непрерывного дозирования существует взаимосвязанность задач обеспечения соответствия соотношения компонентов в смеси рецепту и ее однородности.

Метрология каналов измерения массы. При порционном дозировании, ТС типа «а», измерение массы проводится в одном несоизмерительном бункере, причем конечный результат измерения считывается в статике, т.е. когда падение продукта в бункер из питателя прекратилось, и переходные процессы в упругой механической системе затухли. Это, при одинаковом классе точности каналов измерения массы, обеспечивает максимально достижимую точность измерений, т.к. динамические составляющие погрешности отсутствуют. Вместе с тем, управление отсечкой подачи материала в несоизмерительный бункер ведется при таких условиях измерений, когда динамические составляющие погрешности себя проявляют в полной мере. Наиболее значимой является составляющая погрешности, вызываемая кинетической составляющей падения материала в бункер. Однако на фактическую величину дозы (массы) компонента, попавшего в бункер, влияет не только величина динамической погрешности измерения массы, но и величина «досыпки» этого компонента в несоизмерительный бункер после команды на прекращение его подачи. Ошибки дозирования, вызванные этими факторами, имеют противоположные знаки, и их величина предопределяет величину отклонений соотношения компонентов в полученной смеси от заданного ее рецептом.

Отметим, что когда измерение массы велось только на рычажных весах, то ТС типа «а» фактически не было реальной альтернативы, т.к. такие весы представляют собой сложную механическую систему, которая к тому же для своей реализации требует значительных объемов пространства. Максимально допустимая погрешность измерения массы на таких весах, приведенная к диапазону взвешивания (класс точности) обычно составляет (0,5...1,0 %). При этом измерение ведется дифференциальным методом, т.к.

массу пустого весоизмерительного бункера в рычажном механизме легко скомпенсировать противовесами.

Переход от рычажных весоизмерителей к тензометрическим позволил поднять класс точности измерения массы вплоть до коммерческой, т.е. $\pm 0,1\%$, причем без компенсации массы весоизмерительного бункера механической разгрузкой датчика противовесом. Вместе с тем точность дозирования возросла не так существенно, т.к. при управлении отсечкой подачи материала источники погрешностей сохраняются. Необходимо отметить, что перевод канала измерения массы весоизмерительного бункера на тензодатчики («тензоопоры») существенно упростил и удешевил конструкцию дозатора.

При непрерывном дозировании (ТС типов «б» и «в») количество точек измерения массы соответствует количеству расходных бункеров с компонентами.

В ТС типа «б» масса продукта измеряется на весоизмерительном участке ленты конвейера. Для этого под ленту встраивают роликоопоры, передающие давление от ленты с материалом на тензодатчик. Тензодатчики за счет установки противовеса механически разгружают от суммы сил действующих на него со стороны роликоопор и порожней ленты. Для этой ТС такая разгрузка датчика необходима, т.к. суммарная масса роликоопор и ленты существенно превышает массу материала, размещающуюся на весоизмерительном участке ленты. Ее отсутствие привело бы к очень существенному снижению динамического диапазона работы датчика и, следовательно, к возрастанию погрешностей измерения. Поскольку измерение массы в данном варианте ТС идет в движении, при котором возникают динамические составляющие сил – источник шумов измерения, то класс точности такого измерения обычно составляет $0,5\%$ при усреднении результатов измерения за заданный интервал времени. По ГОСТ 8.469-2002 [7] этот интервал составляет $6 \pm 0,25$ минут. Повышение класса точности самого датчика очень мало влияет на повышение класса точности весоизмерительной системы. Следует отметить, что достижение и такого класса точности требует применения специально изготовленных лент, масса которых практически постоянна по всей длине, применения специальных технологий их соединения, при которой толщина и масса ленты на участке соединения не будет отличаться от остальной ленты. Повышенные требования предъявляются к соосности барабанов и роликов весоизмерительного конвейера, их эксцентриситету и форме, способности его станины минимизировать возникающие деформации и резонировать под воздействием переменных нагрузок и т.д. Отсюда очевидно, что ленточный дозатор (весоизмеритель) представляет собой специальное метрологическое устройство, требующее особых технологий производства и, поэтому, достаточно дорогое.

В ТС типа «в» измеряется масса расходного бункера со шнековым разгрузителем (питателем), для чего он устанавливается на тензоопоры. Сам принцип измерения массы в этом случае не отличается от измерения массы при порционном дозировании. Но условия ее измерения отличаются весьма существенно. Главное отличие состоит в том, что это непрерывное измерение массы, которая непрерывно изменяется во времени. Такая непрерывность измерения неизбежно обуславливает появление в измеряемой переменной шумов, связанных с незатухающими колебаниями бункера под действием сил, вызванных вращением шнека и неравномерным истечением материала из разгрузителя. Из-за изменяющейся массы бункера спектральный состав таких шумов будет непрерывно изменяться, что затруднит их фильтрацию. Следует отметить, что сама такая фильтрация не является здесь самоцелью, а ее действие противоречиво. Во-первых, она должна обеспечить предотвращение транспонирования высокочастотных шумов в низкочастотную область при квантовании сигнала массы по времени при его вводе в цифровой контроллер и, тем самым, предотвратить неустраняемые низкочастотные ошибки в измерениях. А это требует повышения качества предимпульсной фильтрации, в частности, повышения порядка и (или) инерционности фильтров. Во-вторых, она не должна вносить существенных отрицательных фазовых сдвигов (запаздывания) в контур регулирования, стабилизирующий расход компонента смеси на заданном уровне. Последнее приведет к интенсификации собственного движения этого контура и повышению динамических ошибок регулирования. А это уже требует снижения порядка и общей инерционности фильтров.

Перечисленное выше обуславливает то, что при прочих равных условиях точность канала измерения массы в ТС типа «в» всегда ниже, чем в «а».

Алгоритмы управления процессом дозирования. Для всех ТС дозирования алгоритмы управления являются наиболее динамично изменяющейся компонентой комплекса. Это обуславливается следующими факторами. Во-первых, алгоритмы управления являются, по-сути, интеллектуальной компонентой комплекса, и поэтому характер алгоритма самым существенным образом влияет на качество формирования смеси. Во-вторых, при обновлении алгоритмов не требуется значительных капитальных затрат, связанных с модернизацией комплекса. Особенно, если алгоритмы реализуются на цифровых средствах управления (контроллерах, компьютерах) и имеется доступ к кодам их программ.

Одновременно, алгоритмы управления являются наиболее наукоемкой компонентой, и их исследованиям посвящено большое количество научных публикаций и диссертационных работ, в частности [8 –

10]. Необходимо признать, что не все из них являются абсолютно корректными, т.к. модели процессов, которые лежали в основе исследований, не всегда достаточно полно отражали реально существующие особенности объектов управления. Еще более плохие результаты совершенствования алгоритмов, с отрицательным эффектом, часто получаются тогда, когда исследования заменялись умозрительными представлениями. А поскольку в силу и объективных и субъективных причин всегда существует «разрыв» между теорией (ее научными исследованиями и разработками) и практикой их применения, то, с одной стороны, далеко не все такие разработки дошли до практики и подтвердили свою эффективность, с другой – внедренные, но полученные на основе «умозрительных» представлений в значительной мере дискредитировали перспективность сотрудничества разработчиков «железа» комплексов с разработчиками алгоритмов. К сожалению, этому же способствует применение пусть и самых технически совершенных контроллеров, у которых в памяти «защиты» простейшие (типовые) алгоритмы управления с низким (по меркам сегодняшнего дня) уровнем вложенного в них интеллекта.

В ТС типа «а» главная проблема формирования смеси в точном соответствии рецепту, которая очевидна и для разработчиков и для пользователей, и на решение которой направлено совершенствование алгоритмов управления, связана с досыпкой дозируемого материала в несоизмерительный бункер после отключения питателя. Путей решения два.

Первый путь связан с введением дополнительного канала управления подачей материала в несоизмерительный бункер. В этом канале определяется необходимый момент и осуществляется переключение на пониженный расход подачи. Снижение расхода обеспечивается либо за счет снижения скорости вращения шнека питателя, в частности на основе применения частотных преобразователей в цепях питания приводных электродвигателей шнеков, либо за счет переключения подачи материала на питатель с меньшей производительностью (меньшим диаметром шнека), см., например, [11]. Недостатками этого пути является снижение производительности линии дозирования и принципиальная невозможность полного устранения эффекта «досыпки».

Второй путь связан с введением в алгоритм управления процессом обратной связи по ошибке дозирования компонента в предыдущем (предыдущих) циклах дозирования. Часто такую добавку к алгоритму называют «коррекцией досыпки». Следует отметить, что во многих известных авторам случаях коррекцию досыпки сводили к алгоритму: «в новом цикле дозирования компонента его количество, которое будем подавать в несоизмерительный бункер должно быть больше/меньше на величину недосыпа/пересыпа в предыдущем цикле», [12]. Как показали исследования [13 – 15], этот вполне соответствующий здравому смыслу алгоритм не улучшает, а ухудшает качество смеси. Причина в том, что при умозрительной разработке этого алгоритма авторы не учитывали динамических свойств контура обратной связи. А он был неустойчивым. Алгоритмы, позволяющие эффективно реализовать второй путь, описаны в [14 – 16]. Их сущность состоит в следующем: а) расчет величины «коррекции досыпки», т.е. управляющего воздействия в цепи обратной связи, должен вестись на основе классических принципов теории автоматического регулирования, т.е. реализовать, как минимум, дискретный вариант пропорционально-интегрального алгоритма регулирования с параметрами настройки, которые оптимизированы по заданному критерию; б) последовательность дозирования компонентов в каждом цикле выбирается обратной величине относительной среднеквадратической ошибки дозирования этих компонентов; в) заданные значения массы каждого компонента, начиная со второго, в каждом новом цикле формирования смеси должны перерасчитываться в общем случае в ходе оптимизационной процедуры по критерию максимального соответствия формируемой смеси своему рецепту.

В ТС типа «б» главная проблема формирования смеси в точном соответствии с ее рецептом, которая не очевидна и была выявлена только в результате тщательного имитационного моделирования [17, 18], состоит в том, что несоизмерительный транспортер, как объект стабилизации его производительности (управляющее воздействие – изменение скорости движения ленты) является объектом с распределенными по длине ленты параметрами, а системы стабилизации строятся как для объекта с сосредоточенными параметрами. Принципиально важным следствием этой распределенности является то, что вес дозируемого материала измеряется на участке ленты, существенно удаленном от участка его сброса с транспортера, а скорость ленты, в частности, при ее изменении в процессе регулирования расхода, на всех участках одинакова. Это приводит к тому, что чем с большей динамической точностью обеспечивается стабилизация расхода на заданном уровне ленточного транспортера, который вычисляется как результат умножения массы материала на несоизмерительном участке ленты транспортера на ее скорость, тем больше будет динамическая ошибка в стабилизации фактического расхода, т.е. расхода в месте сброса материала с транспортера. Алгоритмы управления, позволяющие преодолеть указанную проблему, описаны в [10, 19]. Их сущность состоит в следующем. В начале неизменяемой переменной – массы материала на коротком участке ленты в месте сброса материала «восстанавливается» по адекватным моделям измерения массы и перемещения материала, и именно оно используется как регулируемая переменная внутреннего

контура регулювання расхода.

Еще одна проблема в ТС типа «б» связана с ограничениями на скорость движения ленты весоизмерительного транспортера. Дело в том, что при регулировании расходов ленточных дозаторов всегда существует вероятность невозможности изменения скорости транспортера до необходимой в текущий момент из-за физического ограничения этой скорости. Выход скорости ленточного дозатора на ограничения, по-сути, означает разрыв обратной связи в контуре стабилизации расхода, и возникновение некомпенсируемых отклонений расхода от его заданного значения. Преодолеть указанную проблему можно включением в алгоритм управления комплексом функции гарантирования [20]. Сущность алгоритма гарантирования состоит в оценке в реальном времени вероятности выхода на ограничение скоростей лент каждого из дозаторов и такой коррекции значения заданной суммарной производительности всех дозаторов, при которой общая вероятность этого события не будет превышать допустимого значения [21, 22].

Для ТС типа «в» совершенствование алгоритмов управления направлено на решение следующих трех основных проблем.

Первая проблема связана с повышением помехозащищенности измерений текущего значения расхода дозируемого материала, который вычисляется дифференцированием по времени изменяющейся массы весоизмерительного бункера. Поскольку, как отмечалось выше, сигнал измерения массы в этой ТС даже в случае его фильтрации включает высокочастотный шум, то операция дифференцирования будет его резко усиливать. Эффективным путем преодоления этой проблемы является отказ от вычисления расхода материала из весодозирующего бункера. Это возможно, если контур регулювання расхода дозируемого материала заменить контуром регулювання заданного закона изменения массы весодозирующего бункера [23]. При этом важной задачей алгоритма управления становится задача динамического согласования начальных условий за датчика изменяющейся массы с фактическим значением массы бункера после его догрузки (загрузки).

Вторая проблема связана с периодической догрузкой дозируемого материала в расходный весоизмерительный бункер в условиях продолжения дозирования, когда использовать информацию о массе материала в весоизмерительном бункере для стабилизации расхода нельзя. В эти периоды алгоритм управления размыкает контур стабилизации расхода (скорости уменьшения массы бункера) и, либо жестко фиксирует свое управляющее воздействие (скорость шнека) [24, 25], либо изменяет его пропорционально изменяющемуся заданному значению общей производительности комплекса дозирования [26, 27]. Во втором случае алгоритм управления реализует принцип разомкнутого управления, решая на основе модели канала «скорость вращения питателя – расход материала» обратную задачу, где аргументом становится заданное значение расхода компонента. Т.к. для каждого вида дозируемого материала и его конкретных свойств модель будет изменяться, то алгоритм управления должен включать в себя элементы адаптации. Задачей адаптации будет определение параметров указанной модели в конкретных условиях дозирования [23].

Третья проблема связана с неравномерностью истечения дозируемого материала из шнекового питателя, что обуславливается принципиальными особенностями его конструкции. Такое же неравномерное истечение материала характерно и для ТС порционного дозирования. Но в отличие от ТС типа «в», там оно, хотя и несколько снижает точность дозирования, но не приводит к ситуации, которую необходимо классифицировать как проблему. Это очевидно, т.к. при порционном дозировании указанная неравномерность подачи на финальной стадии формирования дозы в весоизмерительном бункере может составлять лишь доли процента от общей массы дозы. При непрерывном дозировании, когда материалы дозируемых компонентов подаются шнековыми питателями на смешивание, теряется одно из главных преимуществ непрерывного дозирования – высокая стабильность соотношения компонентов на входе смесителя. Именно это максимально облегчало задачу обеспечения высокой однородности смеси на выходе смесителя в ТС типа «б». В ТС типа «в» соотношения расходов материала компонентов смеси перед смесителем будут меняться в самых широких диапазонах. Причем спектральный состав этих изменений будет определяться скоростью вращения питателей (разгрузителей) весоизмерительных бункеров, а она будет зависеть от заданного рецепта смеси заданной производительности комплекса и характера возмущений. К сожалению, решения данной проблемы методами разработки специальных алгоритмов автоматического управления пока не предложено.

Критерии сравнения и оптимизации алгоритмов управления. Для ТС типа «а» качество формирования смеси часто рекомендуют оценивать по коэффициенту вариации (см., например, [2, 28]):

$$V_c = \frac{100}{\bar{M}_i^u} \sqrt{\frac{1}{(m-1)} \sum_{j=1}^m (M_i^u(j) - \bar{M}_i^u)^2}, \quad (1)$$

где m – количество циклов дозирования;

$M_i^u(j)$ – измеренное значение массы i -того компонента в j -том отвесе;

$\overline{M}_i^u = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m M_i^u(j)$ – математическое ожидание (среднее значение массы каждого (i -того) компонента во всех отвесах в n циклах дозирования).

Следует заметить, что в обоих цитированных источниках в выражениях для V_c «потерь» символ квадрата для разности масс. Это косвенное свидетельство того, что показателем пользовались мало, иначе «потеря» была бы быстро обнаружена.

Коэффициент вариации (1) не характеризует главного – соответствия *соотношения* компонентов в смеси заданному рецепту. Он мог, хотя и приближенно, характеризовать качество смеси для простейших дозаторов с *фиксированными* заданными значениями масс, для которых эти значения устанавливались, например, с помощью стрелок на циферблатной головке. Во всех дозаторах с системами управления, где текущие заданные значения масс *перерассчитываются*, что происходит во всех алгоритмах с компенсацией досыпки, этот показатель для оценки качества смеси неприемлем. Как альтернативу ему целесообразно использовать нормированные оценки погрешностей дозирования [15]. Они характеризуют отклонения фактических (точнее – близких к фактическим) концентраций (соотношений) компонентов в смеси от их значений заданных рецептом.

Оценки погрешностей порционного дозирования могут быть вычислены: 1) для каждого отдельного (i -того) компонента с осреднение по всем « m » циклам дозирования – ΔR_i^i ; 2) для каждого отдельного цикла дозирования с осреднением по всем « n » компонентам, входящих в смесь – $\Delta R^H(j)$; 3) для смеси в целом – с осреднением и по циклам дозирования и по компонентам – ΔR^H . Погрешности ΔR_i^i и ΔR^H (случай «1» и «3») представляют собой числа, а $\Delta R^H(j)$ (случай «2») – функцию номера отвеса j . Важно отметить, что фактические значения концентраций компонентов в смеси r_i^{ϕ} в реальных условия получить невозможно. Но, т.к. погрешность взвешивания (изменения массы) бункера всегда существенно меньше погрешности дозирования, то в качестве r_i^{ϕ} используются значения r_i , вычисляемые по измеренным в ходе дозирования значениям масс компонентов M_i^u :

$$r_i = M_i^u(j) / \sum_{i=1}^n M_i^u(j) \approx r_i^{\phi} . \quad (2)$$

Подчеркнем, что именно это позволяет вычислять предлагаемые оценки погрешностей дозирования, *непосредственно в ходе самого процесса, не проводя сложных лабораторных анализов*. Для того, чтобы сделать соизмеримыми значения погрешностей концентраций ($r_i^{3\phi} - r_i$) для компонентов с различными процентами ввода проводится нормировка значений концентраций относительно их заданных значений $r_i^{3\phi}$, т.е.:

$$r_i^H = r_i / r_i^{3\phi} = M_i^u(j) / r_i^{3\phi} \sum_{i=1}^n M_i^u(j) . \quad (3)$$

С учётом (2) и (3) выражения предлагаемых оценок погрешностей принимают вид:

$$\Delta R_i^H = \frac{100}{r_i^{3\phi}} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left[r_i(j) - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m r_i(j) \right]^2} , \quad i = \overline{1, n} ; \quad j = \overline{1, m} ; \quad (4)$$

$$\Delta R^H(j) = 100 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[(r_i^{3\phi} - r_i) / r_i^{3\phi} \right]^2} , \quad i = \overline{1, n} ; \quad (5)$$

$$\Delta R^H = \frac{100}{m} \sum_{j=1}^m \Delta R^H(j) = \frac{100}{m} \sum_{j=1}^m \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\left(r_i^{3\phi} - M_i^u(j) / \sum_{i=1}^n M_i^u(j) \right) / r_i^{3\phi} \right]^2} . \quad (6)$$

Показатели (4)...(6) могут применяться как на этапах разработки алгоритмов управления весодозирующими комплексами (в ходе имитационного моделирования, когда проводится сравнительный анализ альтернативных алгоритмов и оптимизация их параметров настройки), так и на этапах их эксплуатации – для контроля качества формирования смеси. Важно, что эти показатели не отражают степень однородности смеси, которая должна обеспечиваться заданным режимом смешивания от дозированных компонентов.

Для ТС непрерывного действия (типов «б» и «в») ситуация с оценкой качества дозирования принципиально отличается от рассмотренной выше [29, 30]. Дело в том, что значения фактических концентраций компонентов являются непрерывными функциями времени и должны рассматриваться на выходе смесителя непрерывного действия:

$$r_i(t) = q_i^c(t) / \sum_{i=1}^n q_i^c(t); \quad (7)$$

$$T_{доз} = \arg \left\{ \int_0^{T_{доз}} \sum_{i=1}^n q_i^c(t) dt = M^{зд} \right\}, t \in [0, T_{доз}], \quad (8)$$

где $T_{доз}$ – время формирования (дозирования) смеси заданной массы $M^{зд}$;

$q_i^c(t)$ – расходы дозируемых i -тых компонентов после смесителя непрерывного действия.

Это требует описания смесителя как динамической системы. Процессы смешивания весьма сложны для математического описания, поэтому в полной мере такое описание вряд ли возможно. Однако основное свойство смесителя – сглаживать колебания расходов дозируемых компонентов может быть отображено в форме следующей передаточной функции [8, 31]:

$$W_{q_i - q_i^c}^{cm}(p) = (1 - \exp(-\tau_{сп}p)) \exp(-\tau_{сз}p) / (\tau_{сп}p), \quad (9)$$

где $W_{q_i - q_i^c}^{ci}(p)$ – передаточная функция смесителя по каналу « $q_i - q_i^c$ », $p \equiv d/dt$;

q_i, q_i^c – расходы отдозированных i -тых компонентов перед смесителем и после него;

$\tau_{сп}, \tau_{сз}$ – эквивалентное время эффективного перемешивания компонентов в смесителе и время запаздывания, которое создает смеситель в тракте движения дозируемых компонентов, $\tau_{сп} \leq \tau_{сз}$.

С учетом (9) переменные $q_i^c(t)$, как функции времени для расчетов $r_i(t)$ по (7), по крайней мере, в первом приближении, могут быть найдены из выражения:

$$q_i^c(t) = W_{q_i - q_i^c}^{cm}(p) q_i(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Соответствие сформированной смеси заданному рецепту необходимо оценивать по степени их близости. При этом, во-первых, в качестве меры близости наиболее часто используют величину среднеквадратического отклонения; во-вторых, для «уравновешивания» составляющих погрешности для компонентов с различными $r_i^{зд}$ необходима нормировка переменных входящих в состав показателя «некачественности» смеси. С учетом сказанного, в качестве текущего (мгновенного) значения такого показателя для формируемой смеси целесообразно взять усредненную по количеству компонентов n нормированную погрешность, которая будет являться функцией времени:

$$\Delta R^i(t) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{r_i^{зд} - r_i(t)}{r_i^{зд}} \right)^2}. \quad (11)$$

Для оценки соответствия рецепту всей смеси $M^{зд}$ можно провести усреднение $\Delta R^H(t)$ на всем интервале $T_{доз}$ (такая оценка погрешности будет являться числом):

$$\Delta R^H(T_{доз}) = \frac{1}{T_{см}} \int_0^{T_{см}} \Delta R^H(t) dt. \quad (12)$$

Поскольку $\Delta R^H(T_{доз})$ характеризует близость фактического состава смеси своему рецепту, то ее можно использовать в качестве критерия при синтезе и сравнительном анализе различных алгоритмов управления процессом непрерывного формирования смесей.

Заключение. Проведенный сравнительный анализ вариантов ТС комплексов весового многокомпонентного дозирования и смешивания сыпучих материалов с позиций обеспечения качества формируемых ими смесей позволил более четко выявить конкурентные преимущества и недостатки этих вариантов. Следует отметить, что многие такие недостатки можно отнести к скрытым, выявить которые можно только методами имитационного моделирования, поскольку детальный анализ качества реальной смеси весьма сложен.

Имитационное моделирование является и весьма эффективным инструментом решения задач разработки новых, с более высоким уровнем интеллекта, алгоритмов управления комплексами. Такие алгоритмы нацелены на преодоление недостатков комплексов методами автоматического управления, которые не требуют значительных капиталовложений.

Особо отметим комплексы непрерывного дозирования с весоизмерительными бункерами. Здесь, на наш взгляд, имеется существенный резерв повышения качества, прежде всего – однородности, формируемой смеси за счет совершенствования алгоритмов управления. Это, в частности, сделает актуальной задачу реконструкции комплексов многокомпонентного порционного дозирования и перевод их в режим непрерывного дозирования и формирования смесей.

Литература

1. Весоизирующее оборудование литейных цехов / Богдан К.С., Горбенко В.Н., Денисенко В.М., Каширин Ю.П. – М.: Машиностроение, 1977. – 255 с.
2. Черняв Н.П. Технология комбикормового производства. – М.: Агропромиздат, 1985. – 255 с.
3. Лугинин В.И. и др. Разработка и внедрение техники и технологии непрерывного дозирования и смешивания компонентов комбикормов: Обзор. информ. – М.: ЦНИИТЭИ Минхлебопродукта СССР, 1989. – 24 с.
4. Гинзбург И.Б., Непомнящий С.Б., Трачевский М.Л. Автоматизированные системы управления технологическими процессами в промышленности строительных материалов: (Основы разработки, проектирования и внедрения). / Под ред. И.Б. Гинзбурга. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 272 с.
5. Шварц О., Эбелинг Ф.-В., Фург Б. Переработка пластмасс / Под общ. ред. А.Д. Панаматченко. – СПб.: Профессия, 2005. – 320 с.
6. Автоматизация технологических процессов пищевых производств / Под ред. Е.Б. Карпина – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1985. – 536 с.
7. ГОСТ 8.469-2002. Дозаторы автоматические непрерывного действия. Методика поверки. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Минск, 2002. – 4 с.
8. Фарфель А.И. Синтез математического и технического обеспечения систем управления непрерывным весовым дозированием компонентов комбикормов: Дис... канд. техн. наук: 05.13.07 – Одесса, 1987. – 242 с.
9. Митрофанов С.Ю. Алгоритмы и системы управления весовых дозаторов непрерывного действия комбикормового производства: Дис... канд. техн. наук: 05.13.07. – Одесса, 1989. – 331 с.
10. Шейда Голбад К. Системы гарантирующего управления непрерывными процессами формирования смесей сыпучих материалов: Дис... канд. техн. наук: 05.13.07 – Одесса, 2001. – 146 с.
11. Многокомпонентная линия весового порционного дозирования сухих смесей http://www.notisural.ru/line_dozir.htm
12. Дудник В.В., Маноха И.Е., Чоботов В.П. Использование ЭВМ в кормопроизводстве: – К.: Изд-во УСГА, 1993. – 200 с.
13. Хобин В.А., Дец Д.В. Имитационная математическая модель многокомпонентного весового дозатора периодического действия // *Зернові продукти і комбікорми.* – Одеса, 2002. № 2. – С. 171 – 177.
14. Хобин В.А., Дец Д.В. Сравнительные исследования традиционных и новых алгоритмов управления процессами порционного многокомпонентного весового дозирования // *Автоматизація виробничих процесів.* – К.: НВК «Київський інститут автоматики», 2006. – № 2 (23). – С. 137 – 143.
15. Хобин В.А., Дец Д.В. Автоматизация процессов порционного многокомпонентного весового дозирования: проблемы, пути решения, перспективы // *Зернові продукти і комбікорми.* – Одеса, 2002. № 2. – С. 49 – 56.
16. Хобин В.А. Повышение качества формирования смесей средствами интеллектуализации алгоритмов управления порционным дозированием // *Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы.* – Херсон, 2004. – № 2 (14). – С. 261 – 268.
17. Хобин В.А., Митрофанов С.Ю. Математическая модель весового конвейерного дозатора сыпучих материалов // *Изв. вузов. Пищевая технология*, № 5, 1986. – С. 50 – 54.
18. Шейда Голбад К. Цифровое имитационное моделирование конвейерных весовых дозаторов в среде MATLAB // *Тр. Одес. политехн. ун-та.* – Одесса, 2001. – Вып. 2 (14). – С. 115 – 120.
19. Конвейерный дозатор: А.с. № 1506288 СССР, МКИ G01 G 11/08 / В.А. Хобин, С.Ю. Митрофанов, Ф.С. Гальперин, А.И. Фарфель (СССР). – Заявлено 20.10.87; Опубл. 07.09.89, Бюл. № 33. – 5 с.
20. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления технологическими агрегатами: основы теории, практика применения: – Одесса: «ТЭС», 2008. – 304 с.
21. Хобин В.А., Шейда Голбад К. Принципы гарантирующего управления качеством формирования смесей // *Автоматизація виробничих процесів*, № 2 (9), Київ, 1999. – С. 104 – 109.
22. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления на примере оптимизации процесса непрерывного дозирования // *Автоматизація виробничих процесів.* – К., 2005. – № 2 (21). – С. 54 – 59.
23. Весовой дозатор непрерывного действия: А.с. № 1265486 СССР, МКИ G01 G 11/14 13/28 / В.А. Хобин, С.Ю. Митрофанов, В.А. Шаповаленко, Ф.С. Гальперин, А.И. Фарфель (СССР). – Заявлено

- 04.01.85; Опубл. 23.10.86, Бюл. № 39. – 6 с.
24. Весовой дозатор непрерывного действия: А.с. № 1236320 СССР, МКИ G01 G 11/14 / В.А. Хобин, Ф.С. Гальперин, А.И. Фарфель, С.Ю. Митрофанов (СССР). – Заявлено 28.08.84; Опубл. 07.06.86, Бюл. № 21. – 6 с.
 25. Весовой дозатор непрерывного действия: А.с. № 1310643 СССР, МКИ G01 G 11/08 / В.А. Хобин, Ф.С. Гальперин, А.И. Фарфель, С.Ю. Митрофанов (СССР). – Заявлено 29.08.85; Опубл. 15.05.87, Бюл. № 18. – 6 с.
 26. Весовой дозатор непрерывного действия: А.с. № 1339410 СССР, МКИ G01 G 11/14 / В.А. Хобин, Ф.С. Гальперин, А.И. Фарфель, С.Ю. Митрофанов (СССР). – Заявлено 16.04.86; Опубл. 23.09.87, Бюл. № 35. – 6 с.
 27. Хобин В.А., Митрофанов С.Ю. Гальперин Ф.С. Фарфель А.И. Алгоритмы управления бункерным дозатором непрерывного действия в составе комплекса многокомпонентного дозирования // Приборы и системы управления, № 2, 1987. – С. 28 – 30.
 28. Дудник В.В., Манзій В.М., Бурячинський О.М. Практичні рекомендації щодо поліпшення якості роботи багатоконпонентних вагових дозаторів на комбикормових підприємствах. – Київ, 1993. – 33 с.
 29. Хобин В.А., Фарфель А.И. Критерий оптимальности АСУ ТП дозирования комбикормов // Изв. вузов. Пищевая технология, № 3, 1986. – С. 93 – 97.
 30. Хобин В.А., Шейда Голбад К. Формализация задачи эффективного гарантирующего управления формированием смесей // Наук. пр. ОДАХТ / Одеса: 1999. – Вып. 19. – С. 200 – 203.
 31. Видинеев Ю.Д. Дозаторы непрерывного действия. – М.: Энергия, 1978. – 184 с.