

УДК 681.268

Моделирование процесса работы спирального и шнекового дозаторов на основе структурных преобразований

М.А. Новосельцева, С.Г. Гутова, И.Ю. Чуриков

Кемеровский государственный университет (Кемерово, Россия)

Simulation of Spiral and Screw Dispensers Operations Using Structural Transformations

M.A. Novoseltseva, S.G. Gutova, I.Yu. Churikov

Kemerovo State University (Kemerovo, Russia)

Приготовление однородных по составу композиций из различных материалов, их смешение является широко используемым процессом в пищевой промышленности. Зачастую от исхода этого процесса зависит качество готового продукта. Повышение требований к качеству смесей приводит к необходимости изучения характеристик работы различного рода смесительного оборудования. Одним из таких подходов является математическое моделирование. Рассмотрено моделирование процесса работы спирального и шнекового дозаторов, которые обеспечивают предварительный начальный этап качественного смешения компонентов. Наличие флуктуаций в дозаторах приводит к стохастическим изменениям выходного сигнала, что, в свою очередь, усложняет процесс моделирования. Для решения данной проблемы использованы последовательные структурные преобразования сигнала для фильтрации флуктуаций и аппарат непрерывных дробей для построения математической модели выходного сигнала с дозаторов в форме гармонической составляющей с некоторой амплитудой и круговой частотой. Результаты исследований с высокой точностью позволяют моделировать процессы на входе смесителей непрерывного действия, проводить оценку эффективности процессов смешивания и оценку влияния технологических параметров на качество смесей.

Ключевые слова: аппроксимация выходного сигнала, метод моделирования мультисинусоидального сигнала, теория непрерывных дробей, структурное преобразование, численное моделирование работы дозаторов.

DOI: 10.14258/izvasu(2022)1-15

Введение

Современная пищевая промышленность находится в постоянном развитии, поскольку правильное питание и здоровье человека значительным образом

The making of homogenous mixtures from various materials and their interfusion is a process that has widespread use in the food industry. The quality of the finished product often relies on the outcome of this process. Therefore, the increase of requirements for the quality of mixtures makes studying the operational characteristics of various kinds of mixing equipment a must. One approach to do so is mathematical modeling. The paper reviews the simulation of the spiral and screw dispensers operations, which provide a preliminary initial stage of high-quality mixing of components. The presence of fluctuations in the dispensers leads to stochastic changes in the output signal, complicating the simulation process. Sequential structural transformations of the signal to filter fluctuations are applied to solve this problem. The apparatus of continued fractions is used to construct a mathematical model of the output signal from the dispensers as a harmonic component with a certain amplitude and angular frequency. The research results allow the simulation of processes at the inlet of continuous mixers with high accuracy. Besides, that lets us evaluate the effectiveness of the mixing processes and the influence of technological parameters on the quality of the mixtures.

Keywords: approximation of the output signal, the method of modeling a multisinusoidal signal, the theory of continued fractions, structural transformation, numerical simulation of the dispensers operation.

коррелируют между собой. Качество продуктов ставится во главу угла, так как обеспечивает нормальную жизнедеятельность человека, повышение его работоспособности и сопротивляемости к различного рода

болезням, адаптацию к окружающей среде. В частности, во многих российских регионах ощущается значительная нехватка некоторых витаминов и микроэлементов. Поэтому стараются вводить в рацион комбинированные продукты питания, ликвидирующие недостаток различных веществ.

Таковые вещества обычно содержатся в продуктах в небольших количествах (менее 1 %), поэтому

необходимо провести их равномерное распределение по объему продукта (с различными физико-химическими свойствами) на выходе. Для получения такого равномерного распределения часто используют различные (центробежного типа, винтовые вертикальные, вибрационные) смесители непрерывного действия (СНД) [1], позволяющие получать смеси хорошего качества (см. рис. 1).

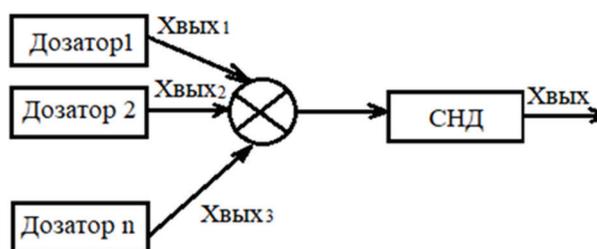


Рис. 1. Структурно-функциональная схема смесительного агрегата

Кроме того, в связи с развитием нанопищевых технологий предъявляются повышенные требования к качеству смесей, при этом содержание наноматериалов в общем объеме смеси может быть весьма незначительно.

Постановка задачи моделирования процесса работы дозаторов

Улучшение качества смеси, получаемой в условиях производства, предопределяет интерес исследователей к математическому моделированию процесса. С использованием кибернетического подхода СНД представляется в виде динамической системы, подверженной некоторым входным воздействиям.

Обязательной частью этой системы является наличие ряда дозаторов, формирующих путем суммирования своих выходных составляющих входной сигнал СНД. Качество приготовляемых в таких СНД композиций зависит не только от внутренних процессов смешения, но и от характера дозирования. Любой из существующих дозаторов не может обеспечить непрерывное поступление сыпучего материала в строго заданных количествах в каждый момент времени. Следовательно, при поступлении компонентов в СНД будут наблюдаться те или иные отклонения в их соотношении от нормы. Для получения заданного соотношения компонентов в готовой смеси СНД помимо качественного смешения компонентов должен обеспечить сглаживание флуктуаций дозаторов. Совершенно очевидно, что характеристики дозатора (величина и форма отклонений производительности от номинальных значений) влияют на кинетику процесса смешивания и в конечном итоге на качество готовой смеси [1–4].

Как отмечали ранее некоторые исследователи [2], к закономерным колебаниям выходного сигнала дозатора могут добавляться особые условия (зависание

материала в бункере, очаговые уплотнения материала, влажность и т.п.), приводящие к стохастическим изменениям выходного сигнала дозатора. Наличие случайности приводит к усложнению процессов математического моделирования и к необходимости использования новых, более совершенных подходов.

Интерес к исследованию производственных процессов смешивания сыпучих материалов в устройствах различных типов достаточно велик. Разработаны различные подходы к моделированию данных процессов. Так, например, в работах [1, 3] сигналы при моделировании рассмотрены как детерминированные и не учитывают флуктуации, описанные выше. Кроме того, для описания производственного процесса ранее использовался аппарат случайных марковских цепей [4–9], однако определение вероятностей в матрице перехода представляет определенную сложность. Ряд экспериментальных исследований был проведен в работах [10–13], также были получены графические результаты о выходном сигнале шнекового дозатора и даны лишь размытые практические рекомендации относительно конструкции системы.

В работе [11] проведены физико-химические исследования дозаторов, которые могут использоваться на этапе их проектирования. В [14] подчеркивается, что процессы в дозаторе не могут быть описаны детерминированными процессами. Но при этом имеющиеся формулы — теоретические [15] и эмпирические [16] — для расчета показателей дозаторов не являются точными и не нашли применения в промышленности. Авторы советуют для изучения и прогнозирования процессов в дозаторах использовать единственный метод, которым является лабораторное тестирование.

Учитывая незавершенность исследований и отсутствие эффективных методов, считаем актуальной

задачу моделирования процессов работы дозаторов в смесительных агрегатах.

Применение структурных преобразований для моделирования мультисинусоидальных сигналов

Рассмотрим построение математической модели выходного сигнала на примере двух дозаторов —

спирального и шнекового. График сигнала на выходе этих двух дозаторов при подаче на вход йодида калия и муки высшего сорта приведен на рисунке 2. Как видно из рисунка, можно предположить, что пульсации выходного сигнала подчиняются мультисинусоидальному закону [4], имеющему смещение, равное среднему массовому расходу материала.

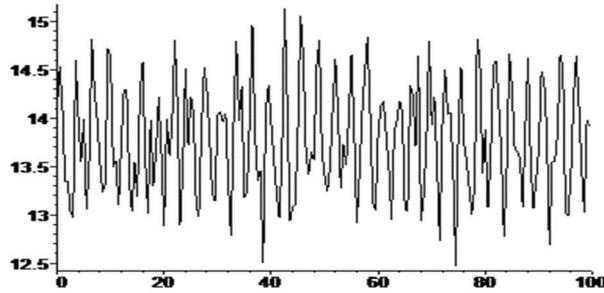


Рис. 2. Выходной сигнал спирального и шнекового дозаторов при подаче на вход йодида калия и муки высшего сорта

Воспользуемся структурным анализом случайных процессов [17, 18] для построения модели зашумленного мультисинусоидального сигнала. Пусть оцифрованные значения мультисинусоидального сигнала с шагом дискретизации Δt для $k = 0, 1, 2, \dots$ определяются соотношением:

$$x(k\Delta t) = \mu + \sum_{i=1}^n C_i \sin(\omega_i k\Delta t) + a(k\Delta t), \quad (1)$$

т.е. представляют собой сумму n гармоник с неизвестными частотами ω_i , амплитудами C_i , постоянного смещения μ и шумовой составляющей $a(t)$.

Структурная функция [17, 18] некоторого случайного сигнала $x(t)$ определяется следующим образом:

$$C_x(k) = \frac{1}{N_1 - k} \sum_{i=1}^{N_1 - k} (x(i) - x(i+k))^2, \quad (2)$$

где N_1 — число измерений сигнала $x(t)$. В дальнейшем будем называть операцию нахождения структурной функции по формуле (2) первым структурным преобразованием и обозначать $C_x^1(k) = C_x(k)$.

В формуле (2) в качестве исходных данных при нахождении структурной функции выступает сам сигнал $x(t)$. Тогда по аналогии можно ввести второе структурное преобразование:

$$C_x^2(k) = \frac{1}{N_2 - k} \sum_{i=1}^{N_2 - k} (C_x^1(i) - C_x^1(i+k))^2, \quad (3)$$

где исходными данными является структурная функция случайного сигнала $x(t)$, т.е. первое структурное преобразование.

Третье структурное преобразование имеет вид:

$$C_x^3(k) = \frac{1}{N_3 - k} \sum_{i=1}^{N_3 - k} (C_x^2(i) - C_x^2(i+k))^2, \quad N_3 < N_2. \quad (4)$$

Практические исследования показали, что при моделировании зашумленного мультисинусоидального сигнала целесообразно использовать именно три последовательных структурных преобразования над исходным процессом. Это объясняется высокой селективностью структурного преобразования по отношению к гармонике с наибольшей амплитудой [17]. Построим модель третьего структурного преобразования сигнала на основании его значений, используя при этом теорию непрерывных дробей и, в частности, модифицированный алгоритм В. Висковатова [17, 19].

По результатам значений третьего структурного преобразования (4) рассчитывают матрицу-идентификатор:

$$\begin{pmatrix} \text{(-1)я строка} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & \dots \end{pmatrix} \\ \text{0ая строка} & \begin{pmatrix} C_x^3(\Delta t) & C_x^3(2\Delta t) & C_x^3(3\Delta t) & \dots & C_x^3(n\Delta t) & \dots \end{pmatrix} \\ \text{1ая строка} & \begin{pmatrix} \alpha_1(0) & \alpha_1(\Delta t) & \alpha_1(2\Delta t) & \dots & \alpha_1((n-1)\Delta t) & \dots \end{pmatrix} \\ \text{2ая строка} & \begin{pmatrix} \alpha_2(0) & \alpha_2(\Delta t) & \alpha_2(2\Delta t) & \dots & \alpha_2((n-1)\Delta t) & \dots \end{pmatrix} \\ \text{3ая строка} & \begin{pmatrix} \alpha_3(0) & \alpha_3(\Delta t) & \alpha_3(2\Delta t) & \dots & \alpha_3((n-1)\Delta t) & \dots \end{pmatrix} \\ \text{4ая строка} & \begin{pmatrix} \alpha_4(0) & \alpha_4(\Delta t) & \alpha_4(2\Delta t) & \dots & \alpha_4((n-1)\Delta t) & \dots \end{pmatrix} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

в которой 0-я строка — значения 3-го структурного преобразования $C_x^3(n\Delta t)$ (4), элементы $\alpha_m(n\Delta t)$ последовательно определяются с помощью соотношения:

$$a_m(n) = \frac{a_{m-2}(n+1)}{a_{m-2}(0)} \cdot \frac{a_{m-1}(n+1)}{a_{m-1}(0)}, \quad (6)$$

где $\alpha_0(n) = C_x^3(n\Delta t)$, $\alpha_1(n) = 1$, $m = 1, 2, 3, \dots$, $n = 0, 1, 2, \dots$.

Если моделируемый процесс имеет вид (1) и он последовательно структурно преобразован согласно (2–4), то в матрице (5) 4-я строка будет являться нулевой.

Дальнейшее моделирование сигнала определяется элементами первого столбца матрицы-идентификатора (5), которые порождают частные числители правильной С-дроби [17]. Это позволяет получить модель третьего структурного преобразования сигнала в форме дискретной передаточной функции (ДПФ) объекта [17]:

$$G(z) = \frac{C_x^3(\Delta t)z^{-1}}{1 + \frac{\alpha_1(0)z^{-1}}{1 + \frac{\alpha_2(0)z^{-1}}{1 + \alpha_3(0)z^{-1}}}}. \quad (7)$$

Если ДПФ содержит два комплексно-сопряженных полюса, то сигнал является периодическим. В противном случае сигнал не относится к виду (1) и не имеет периода.

В случае наличия комплексно-сопряженных полюсов полученная модель ДПФ (7) позволяет определить параметры гармоники с максимальной амплитудой. Первоначально приступают к нахождению круговой частоты ω_1 этой гармоники:

$$\omega_1 = \frac{1}{\Delta t} \arg(z_1), \quad (8)$$

где $z_1 = u \pm iv$ — полюса ДПФ (7).

Тогда амплитуду гармоники находят по формуле:

$$C_1 = \sqrt[8]{\frac{\max(C_x^3(k\Delta t))}{2}}, \quad (9)$$

где $k = 1, \dots, N_s$.

Выявленная гармоника с максимальной амплитудой будет иметь вид:

$$s_1(k\Delta t) = C_1 \sin(\omega_1 k\Delta t). \quad (10)$$

Поскольку число гармоник исходного сигнала неизвестно, необходимо провести следующую процедуру. Используя полученную модель гармоники (10), вычтем ее из исходного сигнала $x(k\Delta t)$, тогда будем иметь сигнал $x_1(k\Delta t)$:

$$x_1(k\Delta t) = x(k\Delta t) - s_1(k\Delta t). \quad (11)$$

После этого с сигналом (11) следует повторить всю процедуру для выявления остальных гармоник в нем. Следующей гармоникой будет являться та, у которой значение амплитуды является наибольшим из оставшихся. Процедура повторяется до тех пор, пока в матрице-идентификаторе (5) элементы 4-й строки будут обращаться в нуль. Таким образом, критерием останова процедуры выявления гармонических компонент в исходном сигнале служит появление ненулевых элементов в 4-й строке матрицы-идентификатора.

Моделирование выходного сигнала спирального и шнекового дозаторов на основе структурных преобразований

Рассмотрим процедуру моделирования выходного сигнала спирального и шнекового дозаторов при подаче на вход йодида калия и муки высшего сорта. Оцифрованные значения сигнала были сняты с шагом дискретизации $\Delta t = 0.5$ с, что составило 200 значений. График сигнала представлен на рисунке 2.

По результатам значений третьего структурного преобразования произведем расчет матрицы-идентификатора (см. табл.).

Расчет матрицы-идентификатора

1	1	1	1	1
0.0180	0.0527	0.0691	0.0518	0.0178
-1.9353	-2.8455	-1.8869	0.0067	0.9947
1.4649	2.8705	2.8904	1.5073	
-0.4891	-0.9980	-1.0324		
0	0			

Далее получим непрерывную дробь, аппроксимирующую модель третьего структурного преобразова-

ния сигнала в форме ДПФ объекта, свернув которую, получим дробно-рациональное выражение:

$$G(z) = \frac{z + 0.9758}{z^2 - 0.9595z + 0.9466}. \quad (12)$$

Полюса ДПФ (12) равны $z = 0.4797 \pm 0.8464i$. Переходим к нахождению параметров сигнала. Согласно (8) круговая частота гармоники $\omega_1 = 2.1103$. Амплитуду гармоники находим по формуле (9), она равна $C_1 = 0.6682$. Тогда выявленная гармоника с максимальной амплитудой определяется уравнением:

$$x_1(t) = 0.6682 \sin(2.1103t). \quad (13)$$

Используя полученную модель гармоники (13), вычтем ее из исходного сигнала $x(t)$. Далее повторим процедуру выявления следующей гармоники по тому же алгоритму. На основе третьего структурного преобразо-

$$x_{\text{мод}}(t) = 13.8213 + 0.6682 \sin(2.1103t) + 0.3835 \sin(4.0667t). \quad (15)$$

Вычитание $x_{\text{мод}}(t)$ из исходного сигнала приводит к остаткам, проверка которых на случайность и коррелированность подтверждает отсутствие гармонических составляющих.

Заключение

В работе построена модель сигнала на выходе спирального и шнекового дозаторов. Основным подходом к ее построению является совместное использова-

вания произведем расчет матрицы-идентификатора, на базе которой получим модель второй гармоники:

$$x_2(t) = 0.3835 \sin(4.0667t). \quad (14)$$

На третьем проходе алгоритма происходит оставов выявления гармонических компонент в сигнале, поскольку в 4-й строке матрицы-идентификатора не наблюдается появления нулевых элементов.

Для оценки смещения вычтем из исходного сигнала значения, полученные согласно (13) и (14). Усреднив полученные результаты, получим, что смещение сигнала, соответствующее среднему массовому расходу материала, равно $\mu = 13.8213$. Таким образом, модель сигнала на выходе спирального и шнекового дозаторов при подаче на вход йодида калия и муки высшего сорта содержит две гармонические составляющие и имеет вид:

ние последовательных структурных преобразований для фильтрации флуктуаций шумов, а также дальнейшее разложение третьего структурного преобразования в непрерывную дробь для оценки структуры и параметров сигнала. Полученная модель является первоначальным этапом моделирования работы смесительного агрегата с использованием СНД и ряда дозаторов, формирующих путем суммирования своих выходных составляющих входной сигнал СНД.

Библиографический список

1. Бородулин Д.М. Разработка и математическое моделирование непрерывно действующих смесительных агрегатов центробежного типа для переработки сыпучих материалов. Обобщенная теория и анализ (кибернетический подход). Кемерово, 2013.
1. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М., 1973.
3. Федосенков Б.А., Иванец В.Н. Процессы дозирования сыпучих материалов в смесеприготовительных агрегатах непрерывного действия — обобщенная теория и анализ. Кемерово, 2002.
4. Селиванов Ю.Т., Першин В.Ф. Расчет и проектирование циркуляционных смесителей сыпучих материалов без внутренних перемешивающих устройств. М., 2004.
5. Гусев Ю.И., Карасев И.Н., Кольман-Иванов Э.Э., Макаров Ю.И., Макевнин М.П., Рассказов Н.И. Конструирование и расчет машин химических производств : учебник для вузов. М., 1985.
6. Першин В.Ф. Моделирование процесса смешивания сыпучего материала в поперечном сечении вращающегося барабана // Теоретические основы химической технологии. 1986. Т. 20. № 4.
7. Сатоми И. Смешивание твердых тел / пер. с японского // Пуранто когаку. 1968. Т. 10. № 5.
8. Кога Д. Исследование процесса смешения частиц с различной плотностью в горизонтальном барабанном смесителе / Пер. с японского // Рика-когу кэнкюсе хококу. 1980. Т. 56. № 5–6.
9. Sayyad T.A., Pershin V., Pasko A., Pasko T. Virtual Modelling of Particles Two-Step Feeding // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1084, № 1. IOP Publishing, 2018.
10. Ola D. C. Screw Feeder Flow Profile of Agro-Food Bulk Solids. Laboratory Stand Review // Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Series II; 2017. Vol. 10.
11. Mehos G., Morgan D. Hopper design principles. January 1, 2016. URL: <https://www.chemengonline.com/hopper-design-principles/?printmode=1> (дата обращения: 23.10.2021).

12. Vetter G. Handbuch Dosieren. Vulkan Verlag Essen. 1994.
13. Vollmann A.G. Untersuchung der Schüttgutförderung in geneigten Schneckenförderern. Dissertation TU München, Germany, 2000.
14. Bortolamasi M., Fottner J. Design and Sizing of Screw Feeders // Proc. Partec 2001, Int. Congress for Particle Technology, Nuremberg, Germany, 27-29 March 2001.
15. Roberts A.W. Predicting the Volumetric and Torque Characteristics of Screw Feeders // Bulk Solids Handling, 1996. Vol. 16. № 2.
16. Screw Conveyors for Bulk Materials — ANSI/CEMA Standard #350, 2019. URL: <https://cemanet.org/wp-content/uploads/2019/06/ANSI-CEMA-350-FinalReview.pdf> (дата обращения: 23.10.2021).
17. Новосельцева М.А. Выявление скрытых периодичностей зашумленных сигналов с помощью модели структурной функции в форме непрерывной дроби // Вестник Кем. гос. ун-та: журнал теоретических и прикладных исследований. 2010. № 4.
18. Романенко А.Ф., Сергеев Г.А. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. М., 1968.
19. Novoseltseva M.A., Gutova S.G., Kazakevich I.A. Structural and Parametric Identification of a Multisinusoidal Signal Model by Using Continued Fractions // 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon. Sochi, 2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501834.