УДК 681.5:517.443

К.А. Дацук, Е.Н. Карнадуд, Д.Б. Федосенков, О.В. Цыганенко, Б.А. Федосенков

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА СМЕСЕПРИГОТОВИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ВО ВРЕМЯЧАСТОТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Статья иллюстрирует применимость методов анализа смесеприготовительных процессов во времячастотном пространстве. В ней представлено подробное описание – помимо традиционных методов частотного анализа с использованием анализируемого окна (обычного и кратковременного Фурье-преобразований) – непрерывного вейвлет-преобразования и так называемого метода вейвлет-поиска соответствия (иначе – адаптивной вейвлет-аппроксимации). Адаптированная для специфических целей восстановления информационных сигналов материалопотоков ингредиентов, поступающих из отдельных дозирующих устройств или с выхода блока мультидозирования, технология метода вейвлет-поиска соответствия имеет ряд специфических особенностей, таких как необходимость наличия избыточных времячастотных словарей, содержащих набор вейвлет-функций; адаптивность выполняемой аппроксимации как по времени, так и по структуре первичного сигнала, и итеративность процедуры выбора определенных атомов из словаря. Практическая реализация специфических особенностей этого метода и используемые при этом математические модели анализа сигналов подтверждают его применимость к решению широкого круга задач смесеприготовления.

Смесеприготовительный процесс, преобразование Фурье, времячастотное распределение, вейвлет-преобразование, функция Габора, вейвлет-поиск соответствия, распределение Вигнера.

Введение

Процессы смесеприготовления, в силу системно-технологических причин, являются нестационарными, времячастотно-зависимыми, поэтому традиционные методы анализа и выработка на их основе соответствующих способов управления рабочими режимами агрегата не могут быть применимы в данной ситуации. Следовательно, необходимо применить такой математический аппарат, который позволяет адекватно анализировать нестационарные (с времязависимым частотным спектром) процессы на отдельных стадиях смесеприготовления, а также создавать эффективные формализованные средства, позволяющие поддерживать и/или корректировать текущие режимы в отдельных технологических узлах агрегата.

Методы исследования

Предметом исследования существующих методик анализа и моделирования динамики процессов массопереноса в агрегате для производства дисперсных композиций являются главным образом стационарные процессы и отображающие их характер временные сигналы. Основной инструмент изучения подобных процессов и сигналов – интегральное преобразование Фурье, которое определяет спектральную функцию исследуемого сигнала. Операции прямого и обратного перехода выполняются соответственно с помощью выражений:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \; ; \quad (1)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega , \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ и f – угловая и линейная частоты сигнала; t – время; $x(t)$ – анализируемый временной сигнал материалопотока; $X(\omega)$ – Фурье-изображение сигнала.

Большинство же процессов получения дисперсных композиций на сигнальном уровне имеет нестационарный характер, то есть в этих процессах параметры материалопотоков изменяются со временем. Иными словами, частота сигнала мгновенного расхода является времязависимым параметром. Возникновение параметрического эффекта, связанного с времязависимым частотным параметром $\omega(t)$ сигнала, объясняется действием следующих факторов.

Во-первых, при использовании более эффективных в технико-экономическом отношении дозирующих устройств объемного типа погрешности в их работе, обусловливаемые неточностью дозирования, приводят к возникновению «разбежки» моментов начала и окончания интервала формирования дозы у порционных дозаторов. Это, в свою очередь, вызывает флуктуацию «монопольных» частот дозирующих сигналов отдельных дозаторов, что создает в определенные моменты быстро- или вялотекущие изменения в частотном наполнении суммарного сигнала, соответствующего стадии ввода материалопотока в смесительный узел, а также модифицированные смесительным оборудованием частотные вариации сигнала на его выходе.

Во-вторых, при использовании в аппаратурном оформлении дозирующего блока непрерывных дозаторов (например, спирального или шнекового) возникновение стохастически меняющихся во времени интервалов сигнала расхода с разными

спектрами объясняется нестабильностью работы приводных механизмов (электроприводов на базе асинхронных двигателей или двигателей постоянного тока). Данное обстоятельство вызывает девиацию частоты дозирования относительно своего номинального значения. Поскольку дозаторы настраиваются независимо, то изменение вектора частот дозирования $\{\omega(t)_{dj}\}^T$, $j=\overline{1,N}$ (N – количество частотно-стационарных участков в осциллограмме $x(t)$) в момент t генерирует вектор разности дозирующих частот $\{\Delta\omega(t)_{dj,k}\}^T$, $j=\overline{1,N}; k=\overline{j+1,j+N}$ при $j = idem$. В подавляющем большинстве случаев в результате такого изменения в работе блока дозаторов на его выходе возникают биения дозирующих сигналов, что ведет к перестройке их частотных спектров: в частности, обогащается низкочастотная полоса спектра. При этом следует помнить, что появление низких частот ведет к ухудшению сглаживающей способности как питателей, так и смесительных устройств, что в конечном счете вызывает снижение качества итоговой смесевой композиции в пределах заданного временного интервала процесса смесеприготовления.

В-третьих, описанные выше режимные флуктуации в функционировании дозаторов – одновременно с изменением физических дозирующих частот – ведут к изменению скважностей сигналов порционных дозаторов, причем меняется весь комплекс скважностей дискретного сигнала конкретного ДУ: λ, μ, ν – значения скважностей (рис. 1) формирования дозы, процесса дозирования без учета отсечки дозатора, входа в номинальный режим дозирования [1]. При этом весьма прихотливо варьируется матрица скважностей с трехмерной внутриклеточной структурой $\{A[\lambda(t)_{dj}, \mu(t)_{dj}, \nu(t)_{dj}; t_\theta]\}$; $dim\ A=[N x \tau]$, $\theta=\overline{1,\tau}$ – дискретные моменты времен. Повышение λ в диапазоне $\lambda > 1$ приводит к возникновению повышенных частот в спектре анализируемого сигнала, при этом полоса частот расширяется, что ведет к ухудшению сглаживающих свойств преобразующих устройств агрегата; разрешение по времени снижается, что не способствует выявлению быстро меняющихся компонент сигнала и, следовательно, осложняется процесс управления режимом смесеприготовления с требуемым качеством. Изменение $\mu = var = 1\ldots2$ ведет к улучшению сглаживания флуктуаций (при $\lambda \cong 2$), а $\mu = var = 2\ldots\infty$ – к ухудшению. С другой стороны, $\nu = var = 1\ldots4$ вызывает также улучшение сглаживающих свойств физических устройств агрегата, а $\nu = var = 4\ldots\infty$ – ухудшение.

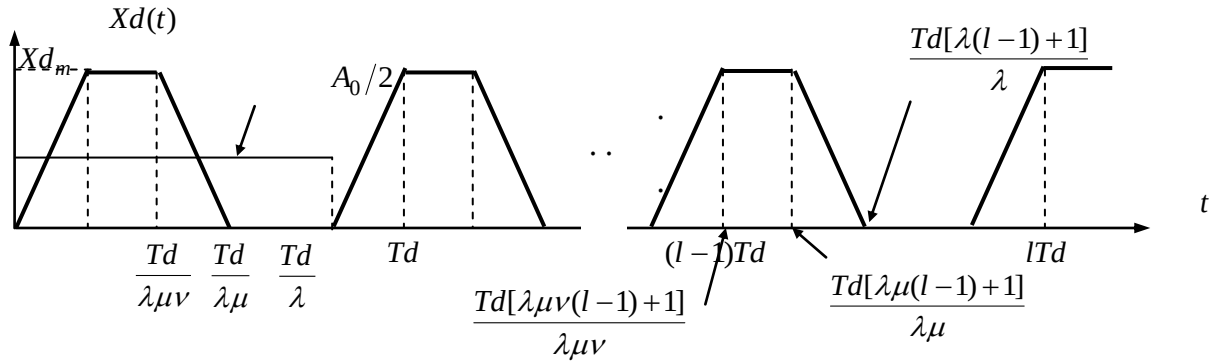


Рис. 1. Параметризация сигнала порционного дозирования для общего режима

Материальный поток на выходе из порционного дозатора, $Xd(t)$, описывается следующей зависимостью:

$$Xd(t)=\sum_{l=1}^{k}\begin{cases}\dfrac{Xm_d\lambda\mu\nu}{Td}\big(t-(l-1)Td\big), & \text{при } (l-1)Td\le t<\dfrac{Td(\lambda\mu\nu(l-1)+1)}{\lambda\mu\nu}\\ Xm_d\ , & \text{при } \dfrac{Td(\lambda\mu\nu(l-1)+1)}{\lambda\mu\nu}\le t<\dfrac{Td(\lambda\mu(l-1)+1)}{\lambda\mu}\\ \dfrac{Xm_d\mu}{1-\mu}\left(\dfrac{\lambda}{Td}\big(t-Td(l-1)\big)-1\right), & \text{при } \dfrac{Td(\lambda\mu(l-1)+1)}{\lambda\mu}\le t<\dfrac{Td(\lambda(l-1)+1)}{\lambda}\\ 0\,, & \text{при } \dfrac{Td(\lambda(l-1)+1)}{\lambda}\le t<lTd\end{cases} \tag{3}$$

где Td – период дозирования; Xm_d – весовой расход материала через дозатор; k – количество формируемых доз (циклов); l – произвольный номер цикла дозирования.

В-четвертых, при создании времязависимых импульсных рециркуляционных режимов в выходном материалопотоке возникают пиковые

высокочастотные составляющие с большой шириной частотной полосы.

Помимо перечисленных факторов, существует множество других причин, вызывающих нестационарность материалопотоков в узлах агрегата.

Посредством классического преобразования Фурье (ПФ) невозможно провести анализ нестационарных сигналов. Однако при анализе таких процессов можно принять некоторый участок нестационарного сигнала в качестве стационарного. В результате такого приближения возникает версия преобразования Фурье – так называемое кратковременное преобразование Фурье (КПФ) [2].

Между КПФ и ПФ существует некоторое различие. В КПФ сигнал разделяется на малые сегменты, достаточные, чтобы считаться стационарными. Для этой цели выбирается оконная функция *w(t)*. Ширина этого окна должна быть равна участку стационарности сигнала. Следующим шагом является перемещение этого окна (в течение некоторых *t'* секунд) к новому участку осциллограммы.

Вышеописанная технология КПФ отображается следующим выражением:

$$X(f,t')_x^w = \int_0^\infty x(t)\cdot w(t-t')\cdot exp(-2j\pi ft)dt \cdot \quad (4)$$

Как видно из выражения (4), КПФ сигнала – это традиционное ПФ сигнала, перемноженного с оконной функцией. Для каждого *t'* и *f* вычисляется новый коэффициент КПФ. Таким образом, получается истинное времячастотное представление сигнала – известны не только частотные компоненты в составе сигнала, но и их локализация во времени.

Проблема КПФ – принцип неопределенности Гейзенберга *(Δt·Δf = const)*, который устанавливает, что можно определить только временные интервалы *Δt*, в которых существует некоторая полоса частот *Δf*, а значит, нельзя знать точное времячастотное представление сигнала, то есть невозможно знать, какие спектральные компоненты в какой момент времени существуют [2].

Следовательно, при использовании КПФ возникает проблема выбора ширины окна. Узкие окна дают хорошее разрешение по времени, но слабое – по частоте. Широкие окна дают хорошую разрешающую способность по частоте, но слабую по времени; кроме того, широкие окна могут нарушить условие стационарности. Данная проблема является результатом того, что оконная функция выбирается раз и навсегда и одно окно используется в течение всего анализа (рис. 2а). Выбор зависит от характера сигнала: если частотные компоненты хорошо отделены друг от друга, то можно пожертвовать некоторой разрешающей способностью по частоте и стремиться к хорошему разрешению по времени. В противном случае выбор подходящей оконной функции может представлять большие затруднения. Таким образом, выявление нестационарностей материалопотока средствами обычного Фурье-преобразования или КПФ, выполняемого при дискретных расчетах на базе быстрого преобразования Фурье, также затруднительно.

Методом анализа материалопотоков, свободного от указанных недостатков, является непрерывное вейвлет-преобразование (НВП – [3]) как альтернативный вариант кратковременному преобразованию Фурье. Вейвлет-анализ выполняется подобным КПФ способом в том смысле, что исходный сигнал перемножается с вейвлет-функцией, аналогичной оконной функции в КПФ, и преобразование вычисляется отдельно для различных сегментов временной области сигнала. Однако имеются два главных отличия между КПФ и НВП:

1) местоположение вейвлет-окна локализуется в окрестности соответствующих неоднородностей сигнала (свойство адаптируемости НВП);

2) ширина окна изменяется (свойство масштабируемости НВП), поскольку преобразование вычисляется для каждого отдельного спектрального компонента, что является самым значительным свойством вейвлет-преобразования.

Непрерывное вейвлет-преобразование определяется выражением

$$W_x^\psi(\tau,s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}}\int_0^\infty x(t)\psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right)dt \cdot \quad (5)$$

Здесь НВП – функция двух переменных (τ и s): параметров смещения и масштаба; $\psi(t)$ – преобразующая функция, или анализирующий вейвлет; множитель $|s|^{-0,5}$ является нормализирующим коэффициентом, гарантирующим $\|\psi(t,\tau,s)\| = 1$.

Таким образом, меняя τ и s, можно получить набор вейвлет-функций, описывающих времячастотное представление анализируемого сигнала, причем при наличии высокочастотных составляющих, т.е. компонент сигнала, существующих на малых временных интервалах, возникает хорошее разрешение по времени. При замешивании в сигнал регулярной низкочастотной составляющей НВП обеспечивает хорошее ω-разрешение. Даный факт интерпретируется покрытием времячастотной области ω-τ неравномерными прямоугольниками с центрами в точках (ω_j; τ_j) (рис. 2б).

Из рисунка видно, что ширина частотной полосы у соответствующей вейвлет-функции увеличивается с возрастанием центральной частоты соответствующего прямоугольника, а последняя, в свою очередь, обратно пропорциональна масштабу *s*. Следовательно, с помощью отмасштабированного вейвлета $\psi^*(t)$ хорошо анализируются резкие временные пики на высоких частотах, а с помощью низкочастотного растянутого вейвлета получаем хорошее ω-разрешение. Отсюда видно, что НВП по своей сути соответствует фильтрации анализируемого сигнала *x(t)* путем его пропускания через набор фильтров конкретной импульсной

переходной функции в виде определенного отмасштабированного вейвлета для каждого фильтра.

Первое, на что следует обратить внимание, – то, что, хотя высота и ширина полей изменяются, площадь поля остается постоянной. То есть каждое поле представляет идентичный по площади блок времячастотной плоскости, но дает различные соотношения времени и частоты. На низких частотах высота полей более низкая (что соответствует лучшим разрешающим способностям по частоте, поскольку имеется меньшее количество неоднозначности относительно значения точной частоты), но их ширина больше (это соответствует недостаточному временному разрешению, так как присутствует большая неоднозначность относительно значения точного времени). В верхних частотах ширина полей уменьшается, то есть временное разрешение становится лучше, а высота полей увеличивается, то есть разрешающая способность по частоте становит более бедной.

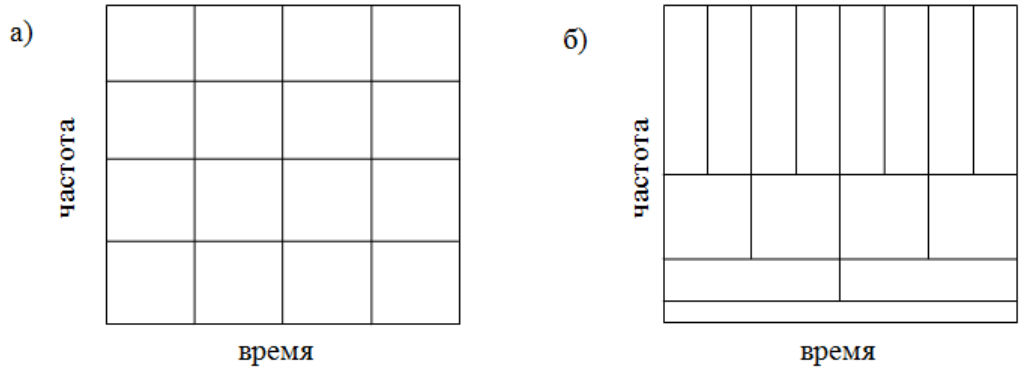


Рис. 2. Времячастотная сетка: а) в кратковременном преобразовании Фурье;
б) в непрерывном вейвлет-преобразовании

В вычислительной среде удобной является диадная дискретизация. Параметры смещения τ и масштаба s с учетом диадной разметки ω/t-плоскости (см. рис. 2б) формируют вейвлет-функцию $\psi(t,\tau,s)$ в двоичной нотации:

$$\psi(t,\tau,s) = 2^{-0,5j} \cdot \psi(\frac{t-k\cdot 2^j}{2^j}) = 2^{-0.5} \cdot \psi(\frac{t}{2^j} - k) \quad (6)$$

где k – коэффициент дискретного смещения. В качестве носителя вейвлет-функции выступает интервал длиной 2^j:

$$\Delta_{j,k} = [k\cdot 2^j, (k+1)\cdot 2^j), \quad (7)$$

где 2 – шаг растяжения/сжатия; 2^j – разрешение вейвлет-анализа (с помощью вейвлет-окна).

Если задан непрерывный сигнал $x(t)$ с финитным спектром $\omega_{x(t)} \leq \omega_{max}$, $F\{x(t)\} \equiv 0$, при $|\omega_{x(t)}| > \omega_{max}$, то в соответствии с теоремой Котельникова-Шеннона [3] он может быть восстановлен полностью по его дискретным значениям $x(iT_S)$, $i = \overline{0,\infty}$, $T_S \leq \frac{\pi}{\omega_{max}}$, ω_{max} – максимальная частота в спектре сигнала; T_S – период дискретизации при аналого-цифровом преобразовании.

Недостатком НВП является неравномерное разрешение на разных участках частотно-временной плоскости.

Указанного недостатка лишено вейвлет-преобразование на основе так называемого алгоритма поиска соответствия (ВПС – [4]), в основе которого – выбор базисных вейвлет-функций, наилучшим способом соответствующих анализируемым сигналам, из специализированных баз данных в виде времячастотных тезаурусов. В соответствии с этим алгоритмом на основе некоторой базисной материнской функции $\psi(t,s,\tau,\xi)$ генерируется семейство вейвлетов путем ее масштабирования (s), смещения (τ) и модуляции (ξ). Полученное семейство представляет собой функции в виде времячастотных атомов. Результатом работы такого алгоритма является возможность высокой времячастотной локализации анализируемых сигналов. Иными словами, такие базисные функции-атомы отражают многочисленные комбинации значений размеров временных и частотных анализирующих окон, в результате чего формируется избыточный набор атомов. Как только виды атомарных функций определены, рассчитывается наилучшее соответствие между ними и осциллограммой исследуемого сигнала путем отображения последней на вейвлет-тезаурус (словарь).

Алгоритм ВПС заключается в следующем. На первом шаге итеративной процедуры из словаря выбирается итоговый вектор g_{I_o}, дающий наибольшее скалярное произведение с анализируемым расходовым сигналом $f(t)$:

$$f(t) = \langle f, g_{I_o} \rangle g_{I_o} + R^1 f. \quad (8)$$

Затем остаточный вектор R^1, полученный после аппроксимации $f(t)$ в направлении g_{I_o}, раскладывается подобным же образом. Итеративная процедура повторяется по последующим получаемым остаточным векторам $R^n f$, $n = \overline{0,m}$, где n – номер итерации.

На каждой итерации выбирается только одна вейвлет-функция $g_{I_{i-1}}$; отбираемый вейвлет $g_{I_{i-1}}$ вводится в аппроксимативное выражение (8) по критерию максимума скалярного произведения вейвлета $g_{I_{i-1}}$ и остаточного вектора $R^{i-1}f$ на *i*-й итерации.

Следовательно, в итоге имеем

$$R^n = < R^n f, g_{I_n} > g_{I_n} + R^{n+1} f \,, \qquad (9)$$

где $R^n f = R^0 f \equiv f(t)$ – остаточный вектор на нулевой итерации (при *n* = 0), равный исходному анализируемому сигналу *f(t)*.

Таким способом сигнал раскладывается в сумму времячастотных атомов, выбранных оптимально соответствующими остаткам сигнала.

Следует отметить, что наиболее адаптивным для аппроксимации реальных дисперсных материалопотоков сыпучих веществ вейвлетом является функция Габора:

$$g_I(t) = S^{-0.5} g\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \exp(i\xi t)\,, \qquad (10)$$

где $g\left(\frac{t-\tau}{s}\right)$ – функция Гаусса.

В раскрытом виде (10) запишется так:

$$g_I(t) = S^{-0.5} exp\left[-\pi(\frac{t-\tau}{s})^2\right] cos(\xi(t-\tau)+\psi_0)\,, \qquad (11)$$

где $I = \{t, s, \tau, \xi\}$ – индекс параметров вейвлета Габора; коэффициент $S^{-0.5}$ приводит вейвлет-функцию к единичной норме: $\|g_I(t)\| = 1$; ψ_0 – начальная фаза гармоники; $\psi_0 = [0, 2\pi]$, ее варьирование преследует цель максимизации скалярного произведения при отборе вейвлетов на каждой итерации.

При дискретной последовательности, то есть при анализе сигналов в виде решетчатых функций, вейвлет Габора имеет вид:

$$g_I(t) = S^{-0.5} exp\left[-\pi(\frac{t-\tau}{s})^2\right] sin\left(2\pi\frac{\xi}{N}(t-\tau)+\psi_0\right), \qquad (12)$$

где *N* – размер сигнала в отсчетах.

Отметим, что при реализации алгоритма ВПС по умолчанию из словаря извлекаются функции Гаусса. Выбор в качестве основных словарных функций вейвлетов Гаусса и Габора приводит к двум положительным факторам:

1) аналитическая реализация таких вейвлетов упрощается;

2) при аппроксимации реальных материалопотоковых сигналов ошибка аппроксимации минимальна.

Результаты и их обсуждение

Оценка представленных выше методов анализа позволяет сделать вывод о том, что исследование процессов получения дисперсных композиций целесообразно выполнять на базе алгоритма ВПС с использованием максимально адаптированных к технологическому процессу вейвлет-функций Гаусса и Габора.

При анализе материалопотоковых сигналов дозирования весьма удобным и показательным является их отображение в виде распределения Вигнера-Вилле [5]. Отображение производится во времячастотном пространстве. Данное распределение является квадратичным, поскольку исследуемый сигнал входит в подынтегральное выражение мультипликативно:

$$W_{\psi,\psi}(t,\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_I(t+\frac{\tau}{2}) \cdot \psi_I(t-\frac{\tau}{2}) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau\,, \qquad (13)$$

где $\psi_I(t)$ – сигнал, восстановленный из набора вейвлет-функций с индексом *I*.

Цифровой анализ двумерных визуально-графических отображений потоков материала в тех или иных точках смесеприготовительного агрегата позволяет определить необходимые параметры, с помощью которых можно эффективно вырабатывать соответствующие управляющие воздействия на исполнительные механизмы дозаторов и других элементов оборудования.

Пример отображения материалопотока на выходе блока дозирующих устройств, состоящего из двух шнековых (работающих в порционном режиме) и спирального (работающего в непрерывном режиме) дозаторов, приведен на рис. 3.

Алгоритм вейвлет-поиска соответствия позволяет закрепить за номинальными режимами работы дозаторов (определяющими требуемую рецептуру и оптимальные флуктуации материалопотоков на выходе блока дозирования) времячастотные образования (эллипсы) на времячастотной плоскости. Контроль за их перемещениями на времячастотной плоскости позволяет управлять динамикой смесеприготовительного агрегата и стабилизировать режимы его работы.

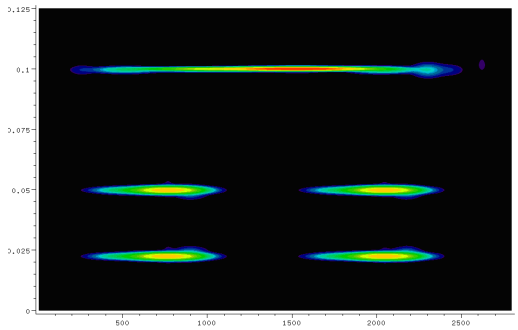


Рис. 3. Распределение Вигнера материалопотокового сигнала на выходе блока дозаторов, формирующего трехкомпонентный поток

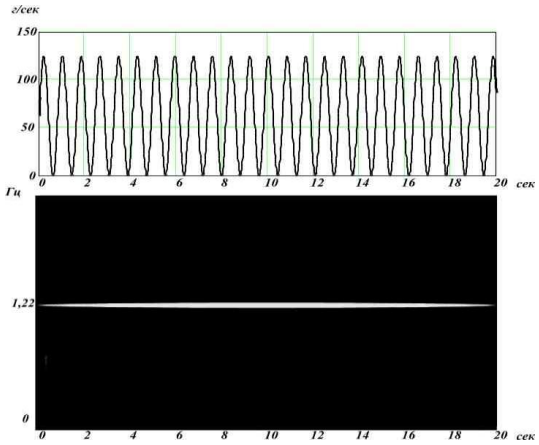
Установлено, что для дозирующей аппаратуры характерны на времячастотной плоскости (карте Вигнера) три типа времячастотных образований:

1) образования, локализованные в окрестности определенной частоты, по форме имеющие вид

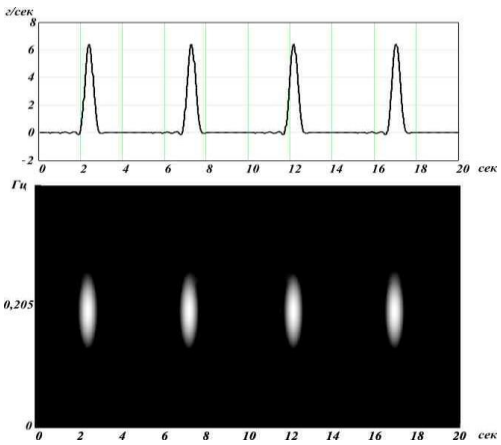
прямой линии – для шнековых и спиральных дозаторов (рис. 4а);

2) образования в форме эллипсов, вытянутые относительно вертикали (оси частот) или растянутые по горизонтали (оси времени) – в зависимости от спектральной насыщенности сигнала и его временного интервала, соответствующие сигналам порционных дозаторов (рис. 4б);

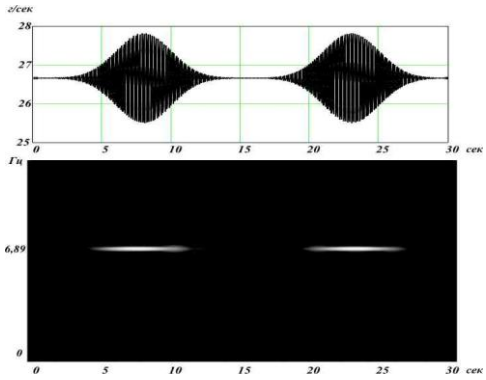
3) эллипсы, вытянутые относительно оси времени, соответствующие шнековым и спиральным дозаторам, функционирующим в импульсном режиме (рис. 4в).



а)



б)



в)

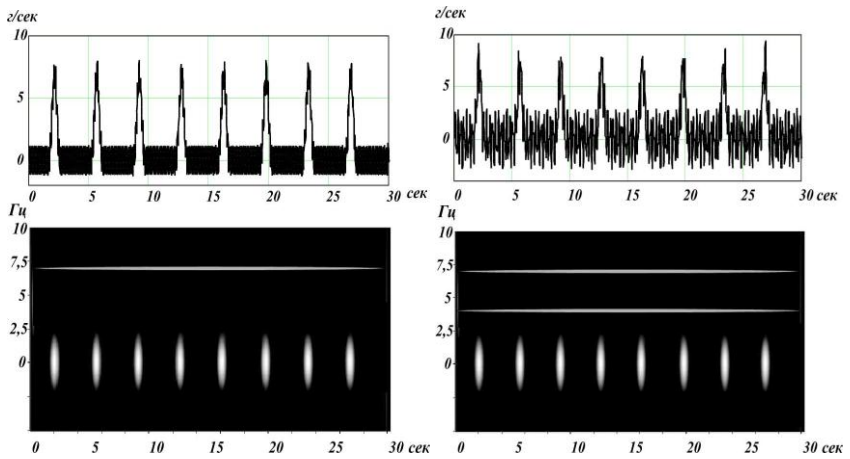
Рис. 4. Материалопотоковые сигналы и карты Вигнера: а) шнекового/спирального; б) порционного; в) спирального (работающего в импульсном периодическом режиме) дозирующих устройств. Номинальные частоты сигналов дозирования соответственно: а) 1,22 Гц; б) 0,204 Гц (период следования доз – 4,9 с); 0,205 Гц – в составе дозы; в) 0,066 Гц (период задания дозы – 15 с); 6,89 Гц (период максимумов в дозе – 0,145 с)

Отметим, что все приводимые далее времячастотные карты (т.е. *2D*-отображения одномерных материалопотоковых сигналов) рассчитываются и изображаются для центрированных одномерных сигналов. Иными словами, все карты модифицированных сигналов материалопотоков рассчитаны и представлены после обработки первичных сигналов посредством высокочастотной фильтрации. Это значит, что «сырой» сигнал подвергнут режекции (вырезанию из амплитудно-частотной характеристики) постоянной составляющей производительности соответствующего дозатора.

При наличии сигнала материалопотока, формируемого несколькими дозирующими устройствами, его карта Вигнера представляет совокупность времячастотных образований, характерных для отдельно функционирующих дозаторов.

Так, на рис. 5а и 5б представлены осциллограммы материалопотоковых сигналов и их времячастотные представления, соответствующие следующим конфигурациям блока дозирующих устройств:

- спиральный и порционный дозатор с рабочими частотами 6,89 Гц и 0,29 Гц;
- два спиральных и порционный дозаторы с рабочими частотами 6,89 Гц, 4,02 Гц и 0,29 Гц (период следования доз – 3,43 с).



а) б)

Рис. 5. Сигналы материальных потоков и их карты Вигнера для двух- и трехкомпонентного дозирования

Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили прийти к выводу, что наиболее адекватным и рациональным способом анализа, мониторирования и управления динамикой процессов при получении сухих дисперсных композиций является подход, основанный на использовании методов и алгоритмов вейвлет-времячастотного преобразования с дальнейшей фиксацией и обработкой модифицированных *2D/3D*-материалопотоковых сигналов в цифровой вейвлет-среде.

Разработанная технология адаптации алгоритма вейвлет-поиска соответствия применительно к обработке нестационарных по частоте материалопотоковых сигналов дала возможность эффективно: а) идентифицировать и контролировать специфические режимы работы дозирующих устройств, обусловленные заданной технологией получения смесевых композиций; б) управлять динамикой смесеприготовительного агрегата, используя при этом карту модифицированного сигнала материалопотока (карту Вигнера) в качестве регулируемой двумерной времячастотной координаты, что в конечном счете позволяет рационализировать процесс производства высококачественных смесей.

Алгоритм вейвлет-поиска соответствия с габоровским словарем обеспечивает наиболее точное описание времячастотных структур среди доступных в настоящее время методов, так как он описывает представленные в сигнале структуры в терминах их времени возникновения, частотного и временного охвата, амплитуды и фазы – с разрешением, которое может быть настроено до теоретических пределов.

Список литературы

1. Федосенков, Б.А. Процессы дозирования сыпучих материалов в смесеприготовительных агрегатах непрерывного действия – обобщенная теория и анализ (кибернетический подход) / Б.А. Федосенков, В.Н. Иванец. – Кемерово, 2002. – 216 с.

2. Coifman, R.R. Wavelet analysis and signal processing / R.R. Coifman, Y. Meyer, and M.V. Wickerhauser // Wavelets and their Applications; B. Ruskai et al, editors. – Boston: Jones and Bartlett, 1992. – P. 153–178.

3. Блаттер, К. Вейвлет-анализ. Основы теории / К. Блаттер. – М.: Техносфера, 2006. – 272 с.

4. Mallat, S. Matching pursuit with time-frequency dictionaries / S. Mallat and Z. Zhang // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1993. – Vol. 41, № 12. – P. 3397–3415.

5. Debnath, L. Recent development in the Wigner-Ville distribution and time-frequency signal analysis / L. Debnath, PINSA, 68, A, № 1, Jan. 2002. – P. 35–56.

ГОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.
Тел./факс: +7(3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

SUMMARY

K.A. Datsuk, E.N. Karnadud, D.B. Fedosenkov, O.V. Tsyganenko, B.A. Fedosenkov

The methods for the analysis of mixture-producing processes in time-frequency space

This paper illustrates the application of methods for the analysis of mixture-producing processes in time-frequency space. It also presents a detailed description, apart from traditional methods of frequency analyses using an analyzing window (ordinary and short-time Fourier transforms), of the continuous wavelet transform and especially so-called wavelet matching pursuit (also known as the adaptive wavelet approximation). Adapted for the specific purpose of reconstructing the flow signal of a material component from a dozer or the resulting signal of a multi-component dozing block, the matching pursuit technique has a number of specific peculiarities such as the presence necessity of redundant time-frequency dictionaries that contain wavelet functions; the adaptability of such an approximation both over a lapsed time and a primary signal structure, and the iterative procedure of selecting certain atoms from a dictionary. The practical manner in which these specific features are implemented and the mathematical techniques used for signal analysis should prove applicable to a wide variety of mixture-producing problems.

Mixture-producing process, Fourier transform, time-frequency distribution, wavelet transform, Gabor function, matching pursuit, Wigner distribution.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia
Phone/Fax: +7(3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru