УДК 681.56621.37

Д.Б. Федосенков, С.В. Токарев, А.А. Симикова, Р.Р. Исхаков, Б.А. Федосенков

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ В ВЕЙВЛЕТ-СРЕДЕ

Рассмотрены методы формирования материалопотоковых сигналов, создаваемых в определенных узлах структурно-функциональной схемы смесеприготовительного агрегата, основанные на преобразовании одномерных исходных сигналов расхода в многомерные; сформирован и описан подход к созданию системы автоматизированного управления технологическим объектом в так называемой вейвлет-среде. Объектом исследования являются процессы дозирования в смесеприготовительных агрегатах для производства сухих мелкодисперсных и/или зернистых композиций различного назначения. Предметная область исследований охватывает методы цифрового управления технологическим объектом, в основе которого – формирование так называемых квадратичных обратных связей на базе вейвлет-преобразований и время-частотных распределений. Разработана векторная автоматизированная система управления смесеприготовительным агрегатом в вейвлет-среде. В качестве основополагающих информационных факторов, позволяющих эффективно анализировать текущие режимы работы смесеприготовительного оборудования, на примере которого рассматривается предлагаемый способ автоматизированного управления объектами различного назначения в вейвлет-среде, используются время-частотные распределения класса Коэна; охарактеризованы обратные связи на основе таких распределений. Представлены результаты цифрового моделирования процессов дозирования многокомпонентным блоком в системе управления с обратными связями по многомерным сосредоточенным переменным в виде время-частотных распределений. За основу анализа процессов при мониторировании и идентификации рабочих режимов дозирования в смесительном агрегате методами вейвлет-преобразований принимается время-частотное распределение Вигнера, позволяющее в наиболее приемлемой форме (с точки зрения дальнейшего процесса обработки полученного отображения – так называемой МСМ-карты, т.е. карты модифицированного сигнала материалопотока) представлять в визуально-графическом виде характерные особенности процесса мультидозирования и с его помощью управлять их динамикой. Это позволяет реализовывать совместно функции управления и непрерывного визуального мониторинга текущих режимов работы агрегата, обогащающие семантическую основу процедуры управления.

Вейвлет-функция, время-частотный атом, распределения класса Коэна, вейвлеты Габора, распределение Вигнера.

Введение

Поскольку процессы смесеприготовления, в силу системно-технологических причин, являются нестационарными, время-частотно-зависимыми, традиционные методы анализа и выработка на их основе соответствующих способов управления рабочими режимами агрегата не могут быть применимы в данной ситуации. Вейвлет-управление в условиях автоматизированного агрегата, осуществляемое подачей управляющих воздействий со стороны мониторингового комплекса для поддержания начальных (номинальных) режимов, позволяет избежать возникновения неблагоприятных условий при реализации процесса смесеприготовления.

Поэтому решение вопросов интенсификации и совершенствования смесеприготовительных процессов в непрерывно действующих агрегатах с центробежными и вибрационными смесителями для переработки сухих дисперсных материалов на базе новых методов управления является актуальной задачей, представляющей значительный практический интерес для ряда ведущих отраслей экономики.

Целью настоящей работы является разработка нетрадиционного аппарата для исследования нестационарных время-частотно-зависимых процессов, использующего в своей основе всплесковые преобразования на основе микролокальных волновых составляющих (вейвлет-функций, или всплесков).

Объект и методы исследования

Объектом исследования являются процессы дозирования в смесеприготовительных агрегатах для производства сухих мелкодисперсных и/или зернистых композиций различного назначения.

Предметная область исследований охватывает методы цифрового управления технологическим объектом, в основе которого – формирование так называемых квадратичных обратных связей на базе вейвлет-преобразований и время-частотных распределений.

Обобщенная теория время-зависимых (динамических) спектров рассмотрена в [4]. Такие распределения представляют собой зависимость энергии (интенсивности) сигнала (здесь – материалопотока)

от времени и частоты одновременно. Частотно-время-зависимые сигналы являются нестационарными. Таким образом, время-частотные распределения являются эффективным средством для анализа нестационарных сигналов. В соответствии с подобным распределением можно выявить, какая доля энергии сигнала лежит в пределах определенного временного и частотного диапазонов, то есть в рамках так называемого допустимого прямоугольника неопределенности (окна Гейзенберга) [5] на время-частотной плоскости.

Из теории Фурье-анализа [1] известно, что мгновенная энергия сигнала (в нашем случае – сигнала материалопотока) $x(t)$ интерпретируется как его интенсивность в единицу времени в момент t, то есть, $|x(t)|^2$ а в течение Δt – $|x(t)|^2\ \Delta t$. Интенсивность же сигнала $x(t)$ на единицу угловой частоты ω равна $|S(\omega)|^2$, где $S(\omega)$ – преобразование Фурье сигнала $x(t)$. Энергия сигнала в интервале частот $\Delta\omega$ составляет $|S(\omega)|^2 \cdot \Delta\omega$. Преобразование Фурье сигнала определяется как:

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} x(t) \cdot \exp(-j\omega t)dt \cdot$$

Совместную время-частотную функцию распределения энергии сигнала в интервалах времени Δt и частоты $\Delta\omega$ определим как $E(t, \omega)\ \Delta t\Delta\omega$. Следовательно, полная энергия сигнала материалопотока равна:

$$E = \int_0^{+\infty}\int_0^{+\infty} E(t,\omega)dtd\omega \cdot \qquad (1)$$

Термин «функция распределения» (или «распределение») применительно к детерминированным нестационарным сигналам используется для того, чтобы показать, как «распределяется» энергия сигнала в прямоугольнике неопределенности – ячейке Δt, $\Delta\omega$.

Эффекты, выражающиеся в появлении интенсивностей сигнала в тех ячейках время-частотного пространства, в которых их не должно быть, являются артефактами, то есть искусственными (виртуальными) проявлениями энергии сигнала. Последние проявляются вследствие билинейной (квадратичной) структуры распределения Вигнера-Вилле [4], которое ведет к появлению так называемых перекрестных (интерференционных) членов, являющихся причиной появления виртуальной интенсивности при анализе многокомпонентных сигналов, к которым принадлежат материалопотоковые сигналы:

$$x(t) = \sum_{k=1,N} S_k(t),$$

где k – номер компоненты; N – количество компонент в структуре сигнала.

Подставив данное выражение в запись обобщенного распределения класса квадратичных время-частотных распределений [4]

$$E_{kl}(t,\omega) = \frac{1}{4\pi^2}\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}\int_0^{\infty} exp[-j(\theta t + \omega\tau + \theta u)] \cdot$$

$$\cdot \Phi(\theta,\tau) \cdot S_k^*(u-\tau/2) \cdot S_l(u-\tau/2)dud\tau d\theta \quad , \qquad (2)$$

где $\Phi(\theta,\tau)$ – ядро распределения, получим:

$$E(t,\omega) = \sum_{k=1,N} E_{kk}(t,\omega) + \sum_{k,l=1,N,k\neq l} E_{kl}(t,\omega),$$

здесь E_{kk} и E_{kl} – соответственно автономные и перекрестные члены, формирующие полную энергию сигнала.

В интерпретации [4] ядро распределения Вигнера, минимизирующее виртуальную энергию сигнала, имеет вид:

$$\Phi(\theta,\tau) = \exp(-\theta^2\tau^2/\sigma), \qquad (3)$$

где σ – константа управления долей виртуальной энергии.

Подставляя такую запись ядра в общую формулу распределения энергии и интегрируя по θ, получим в итоге:

$$E(t,\omega) = \frac{1}{4\pi^{3/2}} \int\int \frac{1}{\sqrt{\tau^2/\sigma}} exp\left\{-\left[(u-t^2)/(4\tau^2/\sigma)\right] - \right.$$

$$\left. - j\omega\tau \right\} S^*(u-\tau/2) \cdot S(u+\tau/2)dud\tau \ .$$

Данное выражение представляет собой конечную запись распределения Вигнера с использованием коррекции в виде экспоненциального ядра (3).

В табл. 1 приведены выражения ряда двумерных время-частотных распределений, которые формируются из обобщенного распределения $E(t, \omega)$ с ядром $\Phi(\theta,\tau)$. Здесь: $x(t)$ – материалопотоковый сигнал; ω и τ, t, u –текущие частота и время; $S^*(\omega)$ – сопряженная спектральная функция сигнала $x(t)$: $S^*(\omega) = \mathrm{Re}\{S(\omega)\} - jIm\{S(\omega)\}$, где $S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^{\tau} x(t)\, exp(-j\omega t)\, dt$ – комплексная спектральная функция сигнала; a – коэффициент формы синуса; σ – коэффициент управления величиной виртуальных членов распределения; $h(\tau)$ – импульсная переходная характеристика смесительной системы (или ее фрагмента).

Таблица 1

Квадратичные распределения и их ядра в составе (2)

Распределение	Ядро $\Phi(\theta, \tau)$	Запись распределения $E(t, \omega)$
Вигнера-Вилле	1	$\frac{1}{2\pi}\int_0^t \exp(-j\omega\tau)\, x^*(t-\tau/2)\, x(t+\tau/2)\, d\tau$
Марджено-Хилла	$\cos\left(\frac{\theta\tau}{2}\right)$	$\mathrm{Re}\,\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\, x(t)\exp(-j\omega\tau)\, S^*(\omega)$
Кирквуда-Рихачека	$\exp\left(j\frac{\theta\tau}{2}\right)$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\, x(t)\exp(-j\omega\tau)\, S^*(\omega)$
Фазонормированный синус	$\frac{\sin a\theta\tau}{a\theta\tau}$ $a = const$	$\frac{1}{4\pi a}\int_0^t \frac{1}{\tau}\exp(-j\omega\tau)\int_{t-a\tau}^{t+a\tau} x^*(u-\tau/2)\, x(u+\tau/2)\, du\, d\tau$
Пейджа	$\exp\left(j\frac{\theta\lvert\tau\rvert}{2}\right)$	$\frac{\partial}{\partial t}\left\lvert\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^t x(t)\exp(-j\omega\tau)\, dt\right\rvert^2$
Чуи-Уилльямса	$\exp(\theta^2\tau^2/\sigma)$	$\frac{1}{4\pi^{3/2}}\iint(\theta^2/\sigma)^{0.5}\exp\left\{-\left[\frac{(u-t)^2}{4\tau^2/\sigma}\right]-j\omega\tau\right\}\times$ $\times\, x^*(u-\tau/2)\, x(u+\tau/2)\, du\, d\tau$
Спектрограмма	$\int_0^t h^*(u-\tau/2)\, h(u+\tau/2)\cdot$ $\cdot\exp(-j\theta u)\, du$	$\left\lvert\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^t \exp(-j\omega\tau)\, x(t)\, h(t-\tau)\, d\tau\right\rvert^2$

Рассмотрим процедуру получения время-частотного распределения материалопотокового сигнала на выходе блока дозирующих устройств, включающего два шнековых дозатора с рабочими частотами ω_1 и $\omega_2 > \omega_1$ При этом считаем, что исходные сигналы получены в результате обработки первичных сигналов посредством высокочастотной фильтрации. Это означает, что постоянная составляющая производительности дозаторов исключена из анализируемых сигналов.

Итак, двухкомпонентный сигнал состоит из двух гармоник и имеет вид:

$$x(t) = X_{m1}\cdot\exp(j\omega_1 t) + X_{m2}\cdot\exp(j\omega_2 t).$$

Тогда исправленное распределение Вигнера запишется как

$$E(t,\omega) = X_{m1}^2\delta(\omega-\omega_1) + X_{m2}^2\delta(\omega-\omega_2) + 2X_{m1}X_{m2}\cos(\omega_2-\omega_1)t\cdot$$

$$\cdot\sqrt{\frac{\sigma}{4\pi(\omega_1-\omega_2)}}\cdot\exp\left\{-\frac{\left[\omega-\frac{1}{2}(\omega_1+\omega_2)\right]^2\sigma}{4(\omega_1-\omega_2)^2}\right\}. \qquad (4)$$

Обозначим:

$$\sqrt{\frac{\sigma}{4\pi(\omega_1-\omega_2)}}\cdot\exp\left\{-\frac{\left[\omega-\frac{1}{2}(\omega_1+\omega_2)\right]^2\sigma}{4(\omega_1-\omega_2)^2}\right\} = \Omega(\omega,\omega_1,\omega_2\ldots\sigma).$$

При $\sigma\to\infty$

$$\lim_{\sigma\to\infty}\Omega(\omega, \omega_1, \omega_2 \ldots \sigma) = \delta[\omega - ½(\omega_1 + \omega_2].$$

Последнее выражение показывает, что на полусуммарной частоте происходят импульсные всплески в виде дельта-функций, объясняемые наличием перекрестного (третьего) члена в выражении исправленного распределения Вигнера (4). При этом, для $\sigma = \infty$ ядро (3) обобщенного распределения (2) $\Phi(\theta,\tau) = 1$, что соответствует обычному распределению Вигнера с наличием виртуальных компонент.

Таким образом, при возрастании/уменьшении σ величина перекрестных составляющих повышается/снижается.

В случае сброса/наброса нагрузки на два дозатора шнекового или спирального типов процессы дозирования являются нестационарными, поскольку носят частотно-время-зависимый характер, то есть представляют собой частотно-параметрические процессы. Суммарный сигнал имеет вид:

$$x(t) = X_{m1} \cdot \exp[(j(\beta_1 t^2 + \omega_1 t)] + X_{m2} \cdot \exp[(j(\beta_2 t^2 + \omega_2 t)]$$

в составе которого присутствуют две мгновенные время-зависимые частоты: $\omega = \beta_1 t + \omega_1$ и $\omega = \beta_2 t + \omega_2$.

И в этом случае виртуальные энергетические компоненты путем соответствующего выбора демпфирующего коэффициента σ легко нейтрализуются. Минимизация виртуальных членов возможна при выборе коэффициента управления виртуальной энергией в диапазоне $\sigma = 10^5 \ldots 6{,}5 \cdot 10^5$.

Для вейвлет-сигналов словаря Габора вида:

$$g\ \ t\ \ = exp\left[-\alpha\frac{t^2}{2} + j\left(\frac{\beta t}{2} + \omega_0 t\right)\right],$$

т.е. сигналов, представляющих собой гармонические сигналы, модулированные функцией Гаусса, распределение Вигнера определяется как:

$$W(t, \omega) = \exp\,[-\alpha t^2 - (\omega - \beta t - \omega_0)^2 / \alpha].$$

Отсюда видно, что при такого рода сигналах распределение Вигнера всегда положительно. Данное свойство позитивности распределения соответствует его семантической особенности – способности отображать энергетическую плотность исследуемого сигнала. Если коэффициент α – мал, то энергия сигнала концентрируется эллипсообразно вдоль линии с частотой $\omega = \omega_0 + \beta t$, являющейся производной фазы $d[(\beta t/2 + \omega_0)t]/dt$. При $\alpha = 0$ (при единичной модуляции) получаем частотно-время-зависимый сигнал

$$x(t)_{\alpha=0} = \exp\,[(j\beta t/2 + \omega_0)t],$$

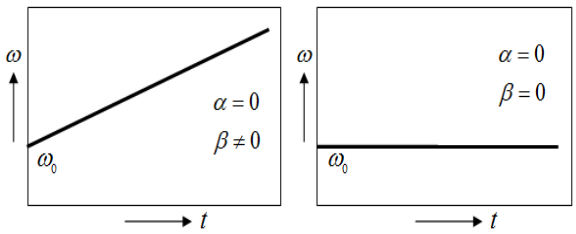
распределение Вигнера которого вырождается в дельта-функцию с наклоном β на время-частотной плоскости (рис. 1а):

$$W(t, \omega)_{\alpha=0} = \delta[\omega - (\beta t + \omega_0)]. \qquad (5)$$

Отсюда видно, что вся энергия локализуется вдоль мгновенной частоты $(\beta t + \omega_0)$.

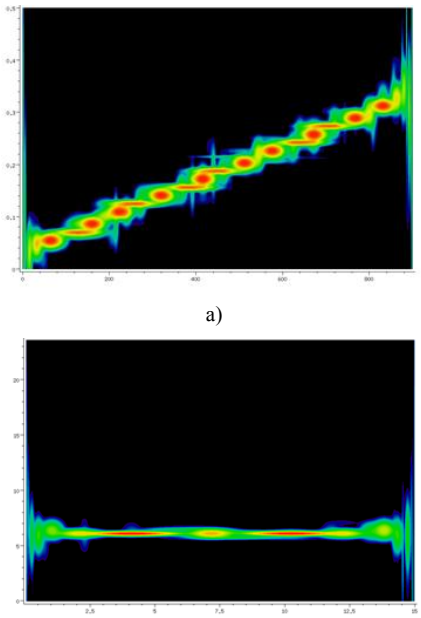
При $\beta = 0$ (и $\alpha = 0$) энергия концентрируется вдоль горизонтальной линии на частоте $\omega_0 = const$ (рис. 1б):

$$W(t, \omega) = \delta(\omega - \omega_0). \qquad (6)$$



а) б)

Рис. 1. Распределение Вигнера для:
а) гармонического сигнала с время-зависимой частотой;
б) гармонического сигнала с постоянной частотой



а)

б)

Рис. 2. Расчетные распределения Вигнера реальных сигналов для случаев:
а) – формула (5) и б) – формула (6)

Фактическая расчетная дискретность и частотно-временной разброс отображения одномерного сигнала в виде его представления в 2*D*-пространстве (МСМ-карты, то есть карты модифицированного сигнала материалопотока) (рис. 2) объясняется, главным образом, действием следующих факторов:

1. неточностью адаптивной аппроксимации исходного сигнала вследствие неквадратичности скалярного произведения по всем отсчетам аппроксимируемого сегмента осциллограммы, то есть в силу соотношения:

$$\left\langle x\ \ t\ \ _k, x\ \ t\ \ _k \right\rangle \neq \left\| x\ \ t\ \ \right\|^2,$$

где $\|x(t)\|^2 = \sum_{k=1,N_l} x(t_k)^2$; k – номер отсчета (дискреты) анализируемого сигнала; N_l – длина дискретного интервала (сегмента осциллограммы); $\|x(t)\|$ – норма сигнала;

2. генетической (присущей по определению) локальной «атомарностью» (ограниченностью величины носителя) вейвлет-функций, используемых для аппроксимации материалопотоковых сигналов;

3. особенностью процедуры вейвлет-поиска соответствия, выражающейся в фрагментарности процесса «проецирования» тех или иных участков осциллограммы исследуемого сигнала на соответствующие словарные поля вейвлет-тезауруса;

4. дискретностью исходного одномерного сигнала, участвующего в численной реализации двумерного распределения;

5. наличием краевых эффектов, вызванных наложением ограничения на ширину расчетного окна (интервала), ведущего к возникновению разрывов первого рода на границах интервала.

Таким образом, при двухкомпонентном гармоническом сигнале в распределении Вигнера возникают концентрации энергии на двух частотах (фактическое распределение энергии) и на полусуммарной частоте (виртуальное распределение энергии). При использовании в составе блока дозирующих устройств дозаторов непрерывного типа (шнековых и / или спиральных) в распределении Вигнера возникают виртуальные концентрации энергии на полусуммарных частотах – при определении средней частоты любых двух дозаторов. Следовательно, для N дозаторов непрерывного типа получаем $(1/2)N(N–1)$ локализованных концентраций виртуальной энергии (табл. 2).

Таблица 2

Количество дозаторов, N	Число виртуальных членов в составе распределения Вигнера
2	1
3	3
4	6
5	10

При расчете время-частотных распределений сложных мультикомпонентных сигналов, последние выражаются в виде дискретных решетчатых функций. В этом случае, в соответствии с теоремой отсчетов [2], распределение Вигнера решетчатого сигнала определяется как:

$$W\ t,\omega\ = \frac{T}{\pi}\sum_{k=0,\infty} s^{*}\ t-kT\ \ s\ t+kT\ \ exp\ -j2\omega kT\ , \quad (7)$$

где $1/T$ – частота отсчетов (частота дискретизации); выбирается из соотношения $T \le \pi/2\ \omega_{max}$, где ω_{max} – максимальная частота в спектре сигнала.

Как видно из выражения (7), дискретное распределение Вигнера – периодично с периодом π (поскольку частота мнимой экспоненты равна 2ω), а не 2π – как в случае непрерывного сигнала. Следовательно, частота дискретизации ω_s должна быть в два раза больше частоты Найквиста ω_N, то есть:

$$\omega_s \ge 2\omega_N = 4\omega_{max}$$

При решетчатой форме сигнала материалопотока, дискретизированного по времени,

$$\hat{x}\ t\ = \sum_{n=0,\infty} x\ nT\ \ \delta\ T-nT\ ,$$

и непрерывной частоте ω получаем дискретную версию распределения Вигнера:

$$\hat{W}\ n,\omega\ = \sum_{k=0,\infty} s^{*}\ \ n-2k\ T\ \ s\ kT\ \ exp\left[-j\omega\ 2k-n\ T\right].$$

Данное выражение соответствует условию безутратного – в информационном смысле – восстановлению непрерывного одномерного материалопотокового сигнала из его дискретного распределения.

Результаты и их обсуждение

В качестве примера картины мониторинга текущих процессов в СМПА для выработки и подачи управляющих воздействий на исполнительный механизм дозатора порционного типа, на рис.3 приведены осциллограмма материалопотока при напряжении U, равном 100 В, на его электроприводе, её вейвлет-аппроксимация и карта Вигнера соответственно. Здесь изображён реальный сигнал дозирования, снятый с пьезоэлектрического преобразователя.

В соответствии с теоремой отсчётов первичный недискретизированный сигнал может быть восстановлен из решетчатой функции при выполнении условия:

$$f_{xd} \ge 2f_x\max = f_N,$$

где $f_x$max– мгновенная максимальная частота в спектре сигнала материалопотока; f_{xd} – частота временной дискретизации аналогового сигнала в АЦП; f_N – частота Найквиста.

Анализ осциллограмм первичного сигнала материалопотока показал, что на средний интервал дозы τ_d =1,1 с приходится 70–80 периодов, что соответствует мгновенной частоте в диапазоне 58,5–66,6 Гц. При количестве отсчетов в АЦП, равном 212 = 4096 на интервале Δt = 17,7 с, частота дискретизации составляет 232,6 Гц.

В нашем случае имеем: 232,6 Гц>2 (58,5–66,6 Гц), т.е. 236,6 Гц > 117 ...133,2 Гц, что соответствует допустимости дискретизации с такой частотой. При этом количество отсчетов на длительности дозы в 1,1 с составляет 256 значений.

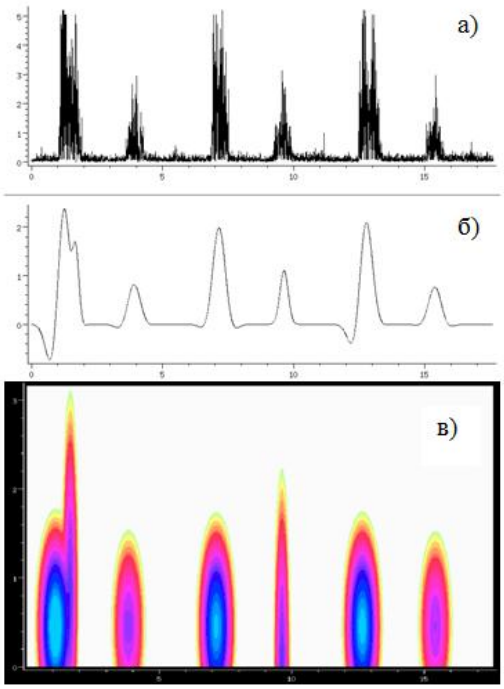


Рис. 3. Преобразование одномерного первичного материалопотокового сигнала в 2D-отображение: а) реальный сигнал, б) реконструированный сигнал по 7 вейвлетам, в) карта Вигнера. Напряжение U = 100 В

С целью определения на картах Вигнера (рис. 3в) элементов, характеризующих текущие режимы процесса дозирования, производится привязка время-частотных атомов, соответствующих номинальным режимам, к определенным время-частотным фреймам. Так, на рис. 4 и 5 представлены фреймированные карты Вигнера: для порционного и спирального дозаторов (фреймы показаны в виде пунктирных окон). Создание фреймов необходимо для определения девиации атомов текущего режима относительно их номинальной локализации на карте. По величине девиации и тарировочным характеристикам – $f_d = F_c(u)$ (для дозаторов непрерывного типа) или $T_d = F_b(u)$ (для дозаторов дискретного типа) – определяется напряжение рассогласования на электроприводе в контуре регулирования соответствующего дозатора, после чего формируется номинальное напряжение, которое через тиристорный управляемый выпрямитель подается на двигатель, приводя последний к номинальному состоянию по частоте вращения.

Таким образом реализуется автоматическое управление режимом работы дозирующего устройства путем формирования обратной связи в ждущем режиме в вейвлет-среде.

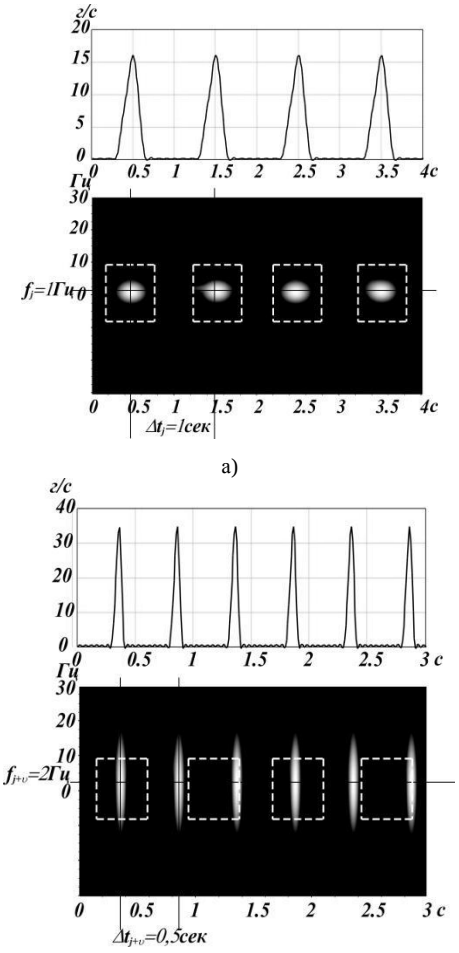


Рис. 4. Осциллограммы и их время-частотные карты, соответствующие номинальному (а) и текущему (возмущенному – б) режимам работы дозатора порционного типа

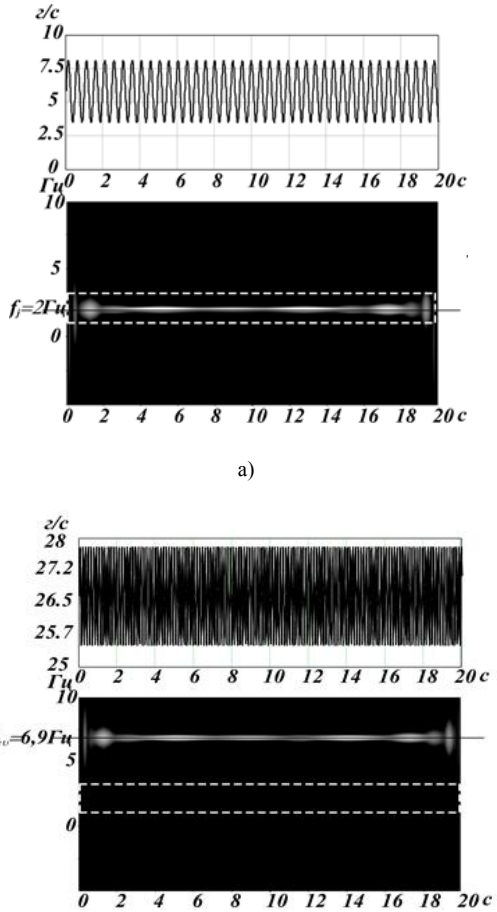


Рис. 5. Осциллограммы и их время-частотные карты, соответствующие номинальному (а) и текущему (возмущенному – б) режимам работы спирального дозатора

Разработанная векторная автоматизированная система управления [7] смесеприготовительным агрегатом в вейвлет-среде представлена на рис. 6. Она состоит из N скалярных автономных контуров управления дозаторами и смесителем. Функциональное назначение элементов схемы указано внутри блоков. Блоки 1, 2, 3, 4 формируют собственно объект управления – смесеприготовительный агрегат. Автономный аналого-цифровой скалярный контур управления дозаторами включает блоки 5–14. В блоке 5 производится текущая регистрация сигналов материальных потоков с помощью первичных преобразователей (тензометрических и пьезоэлектрических датчиков). В состав цифрового вейвлет-сегмента скалярного контура входят блоки 7–12. В блоке 10 определяется цифровое значение текущего напряжения электропривода дозатора $ДУ_j$ – при обращении к базе данных тарировочных характеристик двигателей дозирующих устройств, сформированной в компьютере управления агрегатом. В блоках 11, 12 осуществляется определение корректирующих воздействий на двигатели дозаторов по тарировочной базе $T_j(f_j)=F(u_j)$ и подача откорректированных напряжений на ЦАП, создающих номинальные «фреймированные» МСМ-карты (рис. 4, 5).

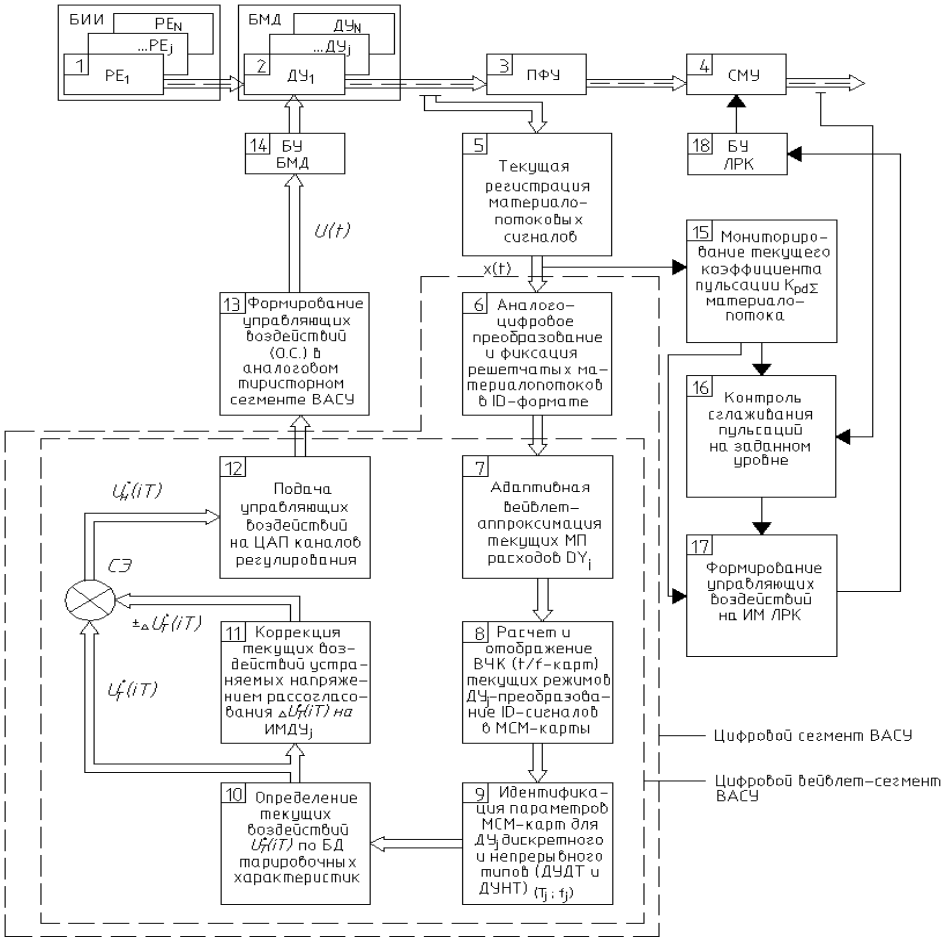


Рис. 6. Блок-схема векторной системы управления смесеприготовительным агрегатом в вейвлет-среде: ⇒ – технологические потоки; → – скалярные информационные потоки; ⇒ – векторные информационные (сигнальные) потоки; *Tj* – период дозирования (для дозаторов дискретного действия); *fj* – частота дозирования (для дозаторов непрерывного действия); БИИ – блок исходных ингредиентов; БМД – блок мультидозирования; РЕ – рецептурная емкость; ЛРК – локальный рецикл-канал; БУ – блок управления; ВАСУ – векторная автоматизированная система управления: СМУ – смесительное устройство (СНД)

В блоке 13 производится комплекс операций по преобразованию цифрового сигнала (кода) потока на выходе модуля «LPT-порт компьютера управления/ ЦАП» в аналоговое напряжение (управляющее воздействие) на зажимах двигателя дозатора. Аналоговое управляющее воздействие формируется в тиристорном управляемом выпрямителе с использованием принципа широтно-импульсной модуляции. Управление смесительным устройством осуществляется реализацией процедур в блоках 15–18. На входе СНД производится мониторирование степени флуктуаций материалопотока путем анализа коэффициента пульсаций $K_{pd\Sigma}$, на выходе ведется непрерывный контроль сглаживающей способности $S^0(\omega)$ смесителя. Для заданных уровней сглаживания и существующем значении коэффициента локального рецикла k_{lr} формируется такое управляющее воздействие на клапан отражающего элемента СНД, которому соответствует меньшее значение k_{lr}, создающее такую же величину сглаживающей способности смесителя. Последний режим ведет к увеличению интенсивности выходного потока, что, в свою очередь, снижает время приготовления смеси и повышает производительность смесительного устройства при прежних параметрах режима смесеприготовления, характеризующих качество смеси.

Заключение

1. Сделан вывод о необходимости применения аппарата вейвлет-преобразований как одного из основных средств, формирующих базовую математическую платформу анализа и моделирования систем управления процессами в смесительных агрегатах и комплексах непрерывного действия.

2. Для выполнения эффективной обработки регистрируемых материалопотоковых сигналов применен алгоритм вейвлет-поиска соответствия, благодаря которому производится аппроксимация сигналов наборами вейвлет-функций из специализированных время-частотных словарей (тезаурусов). С целью возможности визуального семантического представления одномерных переменных (потоков) последние посредством квадратичного распределе-

ния модифицируются в двумерные / трехмерные отображения, которые могут интерпретироваться как динамические текущие спектры материальных потоков в агрегате. Описаны процедуры адаптивной аппроксимации технологических сигналов вейвлет-функциями, генерируемыми в рамках время-частотного избыточного словаря; они позволяют точно (во всем частотном диапазоне материалопотоковых сигналов) и оперативно воспроизводить восстановление одномерных расходовых сигналов в вейвлет-среде.

3. В качестве аппроксимирующего базиса при анализе сигналов используется базис вейвлет-функций Габора с тетрадой параметров τ, s, ξ, φ (соответственно: смещения, масштаба, частоты модуляции и начальной фазы), дающий возможность с высокой точностью восстанавливать реальные анализируемые материалопотоковые сигналы.

4. Для целей визуализации и облегчения управления динамикой одномерных материалопотоковых процессов предложен и используется двухступенчатый подход при их обработке: на первом этапе производится аппроксимация сигналов методом вейвлет-поиска соответствия, на втором – их преобразование в 2D-формат.Специфические особенности непрерывных смесеприготовительных процессов требуют применения нетрадиционных аппаратов вейвлет-преобразований и время-частотных распределений – при реализации процессов обработки технологической информации и формирования условий для управления фрагментами смесительного агрегата в рамках цифровых автоматизированных систем с обратными связями по многомерным координатам.

5. Разработана технология адаптации алгоритма вейвлет-поиска соответствия применительно к обработке нестационарных по частоте материалопотоковых сигналов; это позволило 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 время-частотной координаты, что, в конечном счете, позволяет рационализировать процесс производства высококачественных смесей.

6. Алгоритм вейвлет-поиска соответствия с габоровским словарем обеспечивает наиболее точное описание время-частотных 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.

7. Поскольку смесительная аппаратура (смеситель, каналы направленной организации потока) аппроксимированы звеньями первого / второго порядков и обладают свойствами низкочастотного фильтра, то определенные высокочастотные составляющие сигнала материалопотока, имеющие место на этапе дозирования, могут отсутствовать в спектре сигнала на выходе СМПА и / или в локальном, глобальном рецикл-каналах, и, следовательно, их невозможно использовать для целей управления, т.е. сигналы материалопотока, регистрируемые на выходе смесительных аппаратов, пригодны для управления дозирующими устройствами, работающими с относительно низкими частотами в спектре материалопотоковых сигналов.

8. На базе вейвлет-анализа разработан способ мониторингового управления производственным процессом смесеприготовления, обеспечивающий непрерывный анализ смесей, управление процессом дозирования и динамикой смесительного узла с воздействием на вектор параметров последнего. Автоматизированное управление соответствующим фрагментом реализуется путем дискретного формирования обратной связи в ждущем режиме. Такие процедуры управления могут использоваться в SCADA-подобных системах.

9. Сформированы концепции создания систем управления с обратными связями на основе многомерных время-частотных переменных состояния. Это позволяет – совместно с функцией управления – реализовывать функцию визуального мониторинга текущих режимов работы агрегата, обогащающую семантическую основу процедуры управления.

Список литературы

1. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров/ Г. Корн, Т. Корн. – М.: «Книга по требованию», 2012 – 832 с.
2. Теория автоматического управления / С.Е. Душин, Н.С. Зотов, Д.Х. Имаев и др.; под ред. В.Б. Яковлева. – М.: Высшая школа, 2005. – 567 с.
3. Choi, H. I. Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels / H. I. Choi and W. J. Williams // IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Proc. – 1989. – Vol. 37, № 6. – P. 862–871.
4. Cohen, L. Time-frequency Analysis / L. Cohen. – Englewoods Cliffs: Prentice-Hall, 1995.
5. Daubechies, I. Ten lectures on wavelets / I. Daubechies. – CBMS-NSF; Regional conference series in applied mathematics. – SIAM, PA, 1992.
6. Mallat, Stephane G. A Wavelet Tour of Signal Processing / Stephane G. Mallat. – 2nd edition. – NY: Academic Press, September 1999. – 637 p.
7. Федосенков, Д.Б. Автоматизированное управление с обратными связями по многомерным координатам в виде вейвлет-изображений/ Д.Б. Федосенков, М.Х. Дорри, Б.А. Федосенков // Международная конференция «Перспективы использования новых технологий и научно-технических решений в ракетно-космической и авиационной промышленности», проводимой в рамках Международного Салона аэрокосмических технологий и услуг «AEROSPACE 2008» (Москва): ИПУ РАН, Москва, август 2008. – С. 17–18.

ФГБОУ 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

D.B. Fedosenkov, S.V. Tokarev, A.A. Simikova, R.R. Iskhakov, B.A. Fedosenkov

THE COMPUTER-AIDED CONTROLLING OF TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL PLANTS IN THE WAVELET MEDIUM

Methods of formalizing material flows created in certain knots of structure-and-functional diagram of the mixture producing aggregate are considered, that are founded on transforming one-dimensional initial flow signals into multi-dimensional ones. The approach developed and described is targeted to create the computer-aided system for controlling a technological plant within a so-called wavelet medium. Dosing processes in mixture producing aggregates for receiving dry dispersed compositions of various kinds are considered as a research plant. The subject research field includes digital methods for controlling a technological plant based on the so-called quadratic feedbacks. The latter are formed on the basis of wavelet transforms and time-frequency distributions. The vector computer-aided system for controlling a mixture producing aggregate in a wavelet medium is worked out. As the basic information factors giving the possibility to efficiently analyze current performance regimes of mixture producing equipment (the latter is considered as the example to demonstrate the above method of computer-aided controlling the plants of various type in a wavelet medium) Cohen's class time-frequency distributions are used. The feedbacks based on those distributions are also presented here. The results of digital simulation of the multi-component block dosing processes in the system with feedbacks over multi-dimensional localized variables that are introduced in the form of time-frequency distributions are presented. The Wigner time-frequency distribution is chosen as the main instrument to analyze in a wavelet medium processes of monitoring and identifying performance dosing regimes in the mixture producing aggregate. The distribution is able to present in the most optimal form different singularities of multidosing processes and with its help to control their dynamics. It should be noted that the optimal form of this distribution is determined with further steps as to a received Wigner image processing procedure - here we mean the so-called FMS-map, i.e. the flow modified signal map. All this enables to simultaneously realize both control functions and continuous visual monitoring the current aggregate performance regimes which, in turn, make the semantic base of the control procedure more informative.

Wavelet-function, time-frequency atom, Cohen class distributions, Gabor wavelet, Wigner distribution.

References

1. Korn G., KornT. *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov I inzhenerov* [The handbook on Mathematics for Researchersand Engineers]. Moscow, Book on Demand, 2012, 832 p.

2. Doushin S.Ye., Zotov N.S., Imayev D.Kh. and other. *Teoriia avtomaticheskogo upravleniia* [The automatic control theory]. Moscow, Higher school, 2005, 567 p.

3. Choi H. I., Williams W.J. Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels. *IEEE Trans. Acoustic, Speech, and Signal Proc*, 1989, Vol. 37, no. 6, pp. 862-871.

4. Cohen L. *Time-frequency Analysis*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1995.

5. Daubechies I. Ten lectures on wavelets. *CBMS-NSF; Regional conference series in applied mathematics*. – SIAM, PA, 1992.

6. Mallat, Stephane G. A Wavelet Tour of Signal Processing / Stephane G. Mallat. – 2nd edition. – NY: Academic Press, September 1999. – 637 pp.

7. Fedosenkov D.B., Dorry M.Kh., Fedosenkov B.A. Avtomatizirovannoe upravlenie s obratnym isviaziami po mnogomernym koordinatam v vide veivlet-izobrazhenii [Computer-aided controlling with feedbacks over multidimensional coordinates in the form of wavelet transforms]. *Trudy mezhdunarodnoi konferentsii «Perspektivy ispol'zovaniia novykh tekhnologii i nauchno-tekhnicheskikh reshenii v raketno-kosmicheskoi i aviatsionnoi promyshlennosti», provodimoi v ramkakh Mezhdunarodnogo Salona aerokosmicheskikh tekhnologii i uslug «AEROSPACE 2008»* [Proc. of the international conference “Perspectives for Using Advanced Technologies and Engineering Solutions in Airspace Industry”, The International Exhibition “Aerospace-2008”], Moscow, 2008, August, pp. 17-18.

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

Дата поступления: 18.01.2015