

DOI: 10.24143/2072-9502-2019-4-46-58
УДК 681.5:517.443

МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ДОЗИРОВАНИЯ В СРЕДЕ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ И ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Д. Б. Федосенков¹, А. А. Симикина², Б. А. Федосенков²

¹ Сибирская генерирующая компания,
Москва, Российская Федерация

² Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,
Кемерово, Российская Федерация

На примере системы управления технологическими процессами дозирования в смесеприготовительных агрегатах представлены и описаны необходимые положения для проектирования и рабочего функционирования автоматизированных систем модального управления. Объекты исследования – структура блока дозирующего устройства и переходные процессы при дозировании. Предметом исследования являются вопросы проектирования и создания автоматизированной системы модального управления (АСМУ), функционирующей в режиме перестраиваемых параметрически нестационарных по частоте переходных процессов (ПП). При этом скалярные сигналы материалопотоков расхода дозирующих устройств (ДУ) формируются в терминах пространства состояний (в формате внутренних моделей «вход – состояние – выход»), а мониторингирование этих процессов производится во время-частотной вейвлет-среде. Последнее позволяет проводить анализ протекающих в АСМУ процессов на семантически прозрачном и информационно насыщенном уровне. Представлены параметры (скважности) Фурье-модели сигналов дискретного дозатора, от которых зависит характер процесса дозирования. Сформирована модель блока дозаторов в терминах пространства состояний. Рассмотрены 1D-сигналы расхода и их отображения в виде время-частотных распределений (*W*-карт). Разработана новая концепция модального управления расходом блока дозирующих устройств смесеприготовительного агрегата путем введения понятия параметрической нестационарности внутренней среды дозирующих устройств, учитывающей варьирование многомерного коэффициента обратной связи по состоянию в режиме реального времени в ходе переходных процессов в системе, причем с целью экспериментальной оценки параметров (здесь: постоянных времени) переходных процессов последние определяются по отображениям сигналов расхода на *W*-картах. Используемая в системе вейвлет-среда оперирует время-частотными распределениями класса Козна (преобразованиями Вигнера – Вилля и Чуи – Уилльямса). Сочетание моделей ПП в терминах пространства состояний и их представление в формате распределений Вигнера позволяет оценивать, задавать и переназначать параметры внутренней структуры объекта управления (отдельного дозатора или блока дозирующих устройств) в режиме реального времени с целью достижения эффекта стабилизации расхода ингредиентов в номинальном режиме на предсмесительной стадии. Возмущенные режимы представлены в виде процессов, восстанавливающих номинальные режимы (так называемые обратные ПП). Разработана и описана процедура реализации алгоритма модального управления процессом дозирования, в том числе технология принудительной локализации и релокации полюсов объекта в условиях нестационарных процессов в системе «исполнительный механизм – ДУ», на примере дозатора непрерывного действия в возмущенном режиме при сбросе нагрузки (при нисходящем обратном переходном процессе). Для данного режима представлен расчет нестационарной матрицы модального регулятора.

Ключевые слова: модальное управление, переходные процессы при набросе и сбросе нагрузки, параметрически нестационарные чирп-сигналы, время-частотная вейвлет-среда, распределение Вигнера, *W*-карта, матрица модального регулятора.

Для цитирования: Федосенков Д. Б., Симикина А. А., Федосенков Б. А. Модальное управление процессами дозирования в среде пространства состояний и вейвлет-преобразований // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 4. С. 46–58. DOI: 10.24143/2072-9502-2019-4-46-58.

Введение

Применение в промышленности непрерывно действующих смесительных аппаратов не получило широкого распространения в силу нерешенности ряда вопросов. В частности, недостаточно полно изучено влияние режимных параметров блока дозирующих устройств на характер и структуру выходных материальных потоков, формируемых на предсмесительной стадии, от которых в конечном счете зависит качество готовой смеси. Кроме того, не установлены и не сформулированы технологические причины возникновения неустойчивости процесса дозирования вследствие такого влияния и, как следствие, не разработаны условия и способы введения принудительной параметрической нестационарности режимов работы блока дозаторов с целью динамической стабилизации материалопотоков при смене входных воздействий. Ликвидировать такого рода недостатки можно с помощью модального управления, дающего возможность (путем перестройки параметров замкнутой системы с обратной связью по состоянию) поддерживать выходные потоки блока дозаторов на требуемом номинальном уровне.

С учетом реальных условий возникает необходимость в разработке и адаптации альтернативного метода для моделирования, исследования и усовершенствования разнохарактерных нестационарных по частоте процессов дозирования, который, будучи реализован на компьютерной основе, позволил бы автоматизировать процесс управления режимами работы в целях интенсификации смесеприготовления. Таким методом, дающим возможность проводить высокоточный анализ разнохарактерных процессов, является метод всплескового (вейвлет) преобразования на основе адаптивной аппроксимации исследуемых сигналов базовыми локальными волновыми составляющими (вейвлет-функциями).

Объектом исследования является структура блока дозирующих устройств и процессы дозирования в смесеприготовительном агрегате непрерывного действия.

Предметная область исследования охватывает вопросы, связанные с проектированием и созданием автоматизированной системы модального управления процессами дозирования, функционирующей в режиме перестраиваемой параметрической нестационарности и в условиях мониторинга этих процессов в вейвлет-среде.

Цель работы – разработка и исследование аппаратной и программной основы комплекса для моделирования и текущего мониторинга процессов дозирования в составе смесеприготовительного агрегата на основе вейвлет-преобразований, разработка системы автоматизации блока дозирования на базе методов модального управления переходными процессами дозирования.

Научная новизна работы заключается:

- в формировании математических моделей объекта управления (блока дозирующих устройств – БДУ) высокого порядка, включающего дозирующие устройства (ДУ) непрерывного и дискретного действия – в терминах метода пространства состояний;
- создании и реализации концепции модального регулирования расхода БДУ на базе теории пространства состояний в сочетании с аппаратом вейвлет-преобразований;
- разработке процедуры многомерно-точечного отображения одномерных материалопотоковых сигналов расхода время-частотными вейвлет-распределениями класса Коэна;
- разработке алгоритма динамического пересчета параметров модального регулятора с учетом идентификации режимов дозирования по вейвлет-картам при спорадическом проявлении параметрической нестационарности.

Математические модели сигналов дозирующих устройств непрерывного и дискретного действия

В работе представлены математические модели сигналов расхода дозирующих устройств непрерывного и дискретного действия. Дозаторы непрерывного действия (НДУ) – спиральные и шнековые – описываются моделями третьего порядка.

На основе опытных данных, полученных в ходе исследований порционных дозаторов разных типов (шлюзового, с возвратно-поступательным механизмом, тарельчатого, карусельно-станканчатого, а также микродозаторов), в качестве общего подхода был выбран способ точной формализации [1] сигнала порционного расхода. Сигнал порционного, или дискретного, дозирующего устройства (ДДУ), сформированный с учетом такого подхода, представлен на рис. 1.

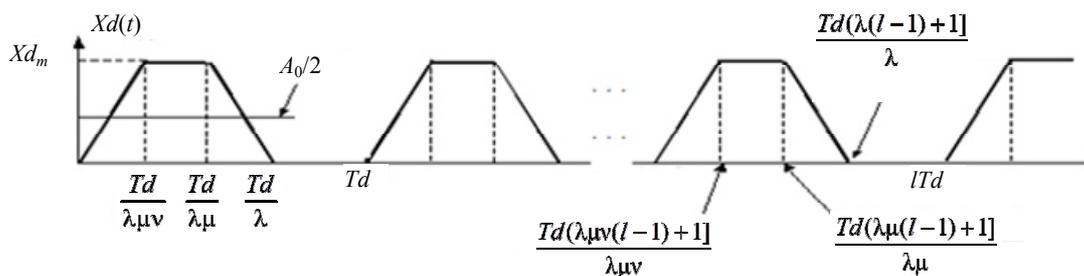


Рис. 1. Параметризация сигнала порционного дозирования для общего режима

При таких условиях поток на выходе из порционного дозатора на протяжении произвольного количества циклов описывается функциональной зависимостью

$$X_d(t) = \sum_{l=1}^k \begin{cases} \frac{X_{m_d} \lambda \mu \nu}{T_d} (t - (l-1)T_d) & \text{при } (l-1)T_d \leq t < \frac{T_d(\lambda \mu \nu (l-1) + 1)}{\lambda \mu \nu}, \\ X_{m_d} & \text{при } \frac{T_d(\lambda \mu \nu (l-1) + 1)}{\lambda \mu \nu} \leq t < \frac{T_d(\lambda \mu (l-1) + 1)}{\lambda \mu}, \\ \frac{X_{m_d} \mu}{1 - \mu} \left(\frac{\lambda}{T_d} (t - T_d(l-1)) - 1 \right) & \text{при } \frac{T_d(\lambda \mu (l-1) + 1)}{\lambda \mu} \leq t < \frac{T_d(\lambda (l-1) + 1)}{\lambda}, \\ 0 & \text{при } \frac{T_d(\lambda (l-1) + 1)}{\lambda} \leq t < lT_d, \end{cases} \quad (1)$$

где T_d – период дозирования; X_{m_d} – весовой расход материала через дозатор; k – количество формируемых доз (циклов); l – произвольный номер цикла дозирования; λ , μ , ν – соответственно значения скважностей: порционного дозирования, интервала формирования дозы до начала отсечки и интервала достижения режима номинального дозирования.

Разложение дозирующего сигнала (рис. 1) в тригонометрический ряд Фурье с произвольным периодом имеет вид:

$$\frac{A_0}{2} + \sum \left(A_k \cos \frac{2k\pi}{T_d} t + B_k \sin \frac{2k\pi}{T_d} t \right); \quad \begin{cases} A_0 = \frac{2}{T_d} \int_0^{T_d} X_d(t) dt, \\ A_k = \frac{2}{T_d} \int_0^{T_d} X_d(t) \cos \left(\frac{2k\pi}{T_d} t \right) dt, \\ B_k = \frac{2}{T_d} \int_0^{T_d} X_d(t) \sin \left(\frac{2k\pi}{T_d} t \right) dt, \end{cases}$$

где A_0 , A_k , B_k – коэффициенты Фурье-модели; t – текущее время; $X_d(t)$ – сигнал расхода порционного дозатора.

Определены коэффициенты Фурье-разложения как функции режимных параметров дозирования (λ , μ , ν , T_d , X_{m_d}) для наиболее типичных режимов работы порционных дозаторов.

Итоговая расчетная модель блока дозаторов (рис. 2), состоящая из спирального и шнекового ДУ и трех ДУ порционного типа (ПДУ), рассматривается как векторная динамическая система в пространстве состояний.

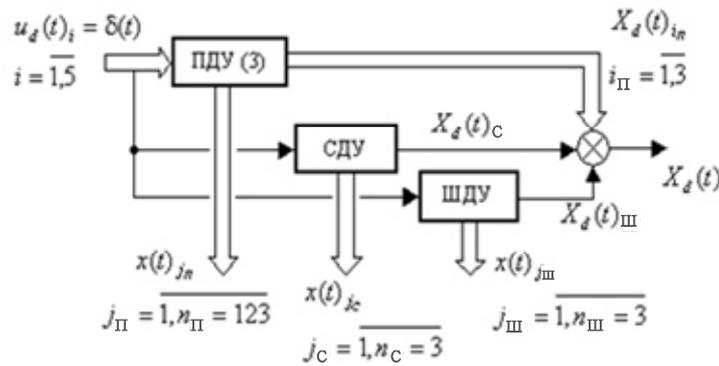


Рис. 2. Блок ДУ в виде структурного фрагмента схемы моделирования смесеприготовительного агрегата в технологическом пространстве состояний

При моделировании процессов в блоке ДУ в пространстве состояний [2, 3] на основе операторных функций звеньев составляется система дифференциальных уравнений, которая затем преобразуется в систему дифференциальных уравнений состояния, записанных в нормальной форме Коши, и линейное алгебраическое уравнение выхода, выражающее выходной сигнал системы через комбинацию переменных состояния и сигнала управления. Представляя набор переменных в виде векторов, а набор параметров в виде соответствующих матриц, получаем векторно-матричную модель (ВММ) агрегата в пространстве состояний.

Блок дозирования на структурном уровне представлен системой SISO (англ. *single input – single output*). Для численной обработки сигналов и реализации функций управления использовались персональные компьютеры ППЭВМ IBM-совместимого типа. В качестве базового программного обеспечения были приняты универсальные интегрированные пакеты: Mathcad 7.0 Professional, Maple V Release 4.0, MathLab 5.2, а также инструментальный пакет Classic 3.0.

Итоговая модель дозирующего сигнала спирального дозатора (рис. 2) в терминах пространства состояний [4] имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = -\omega_{d_1}^2 x_1(t) + X_{dm_1} \omega_{d_1} u(t), \\ \dot{x}_3(t) = X_{d_0} u(t), \\ u_1(t) = x_1(t) + x_3(t). \end{cases}$$

Векторно-матричная модель дозирующего сигнала шнекового дозатора соответственно выглядит так:

$$\begin{cases} \dot{x}_4(t) = x_5(t), \\ \dot{x}_5(t) = -\omega_{d_2}^2 x_4(t) + X_{dm_2} \omega_{d_2} u(t), \\ \dot{x}_6(t) = X_{dm_2} u(t), \\ u_2(t) = x_4(t) + x_6(t). \end{cases}$$

Дозирующий сигнал i -го порционного ДУ, представленный Фурье-моделью, соответствующей общему режиму загрузки смесителя (см. рис. 1), характеризуется системой дифференциальных уравнений в форме Коши, которая в пространстве состояний примет вид

$$\begin{cases} \dot{x}_7(t) = \frac{A_0}{2} u(t), \\ \dot{x}_{2l}(t) = x_{2l+1}(t) \\ \dot{x}_{2l+1}(t) = -((q-1)\omega_b)^2 \cdot x_{2l}(t) + u(t) \end{cases} \quad \left. \vphantom{\begin{cases} \dot{x}_7(t) = \frac{A_0}{2} u(t), \\ \dot{x}_{2l}(t) = x_{2l+1}(t) \\ \dot{x}_{2l+1}(t) = -((q-1)\omega_b)^2 \cdot x_{2l}(t) + u(t) \end{cases}} \right\} q = \overline{2,11}, \quad l = \frac{(1-(-1)^q)}{2} + 2q, \\ u_b(t) = x_7(t) + \sum x_{2i}(t), \quad i = \overline{4,12},$$

где l – нормированный индекс переменной состояния; q – переопределенный номер полной гармоники.

По ВММ сформирована полная расчетная структурная схема БДУ в соответствии с рис. 2.

Получаемые первичные осциллограммы сигналов зашумлены и нестационарны по частоте, следовательно, в любой момент времени обладают случайно меняющимся мгновенным динамическим спектром. Отобразить такие спектры на визуальном уровне существующими традиционными способами не представляется возможным.

В связи с этим в работе реализован новый подход, в основе которого лежат математические модели и алгоритмы аппроксимации, идентификации и коррекции контролируемых переменных в определенном пространстве. Последнее осуществляется на платформе вейвлет-функций и сформированных на их основе время-частотных вейвлет-тезаурусов Габора [5]. При этом используемая информация о состоянии объекта отображается в вейвлет-среде в формате двумерных/трехмерных квадратичных распределений класса Коэна [6, 7]. В качестве рабочих использовались распределения Вигнера и Чуи – Уилльямса [5, 7, 8].

Суть процедуры управляющего мониторинга сводится к следующему.

При изменении структуры спектра временного вектора сигнала изменяется время-частотная локализация соответствующих элементов (атомов) на карте Вигнера [8], что должно быть визуализировано и отслежено мониторинговым комплексом, после чего формируется управляющее воздействие на электропривод дозатора.

Учитывая, что в БДУ отдельные дозаторы спорадически меняют свои выходные сигналы (вследствие варьирования входных воздействий за счет спонтанного изменения физико-механических характеристик поступающих в ДУ ингредиентов), представляется целесообразным наблюдать за общим выходным сигналом расхода БДУ, на вейвлет-карте которого запечатлены все сигналы отдельных ДУ. При этом на мониторе формируются «номинальные» фреймы (специфические окна-рамки – рис. 3), на которые проецируются время-частотные атомы вейвлет-распределения (например, распределения Вигнера), соответствующие номинальному режиму дозирования.

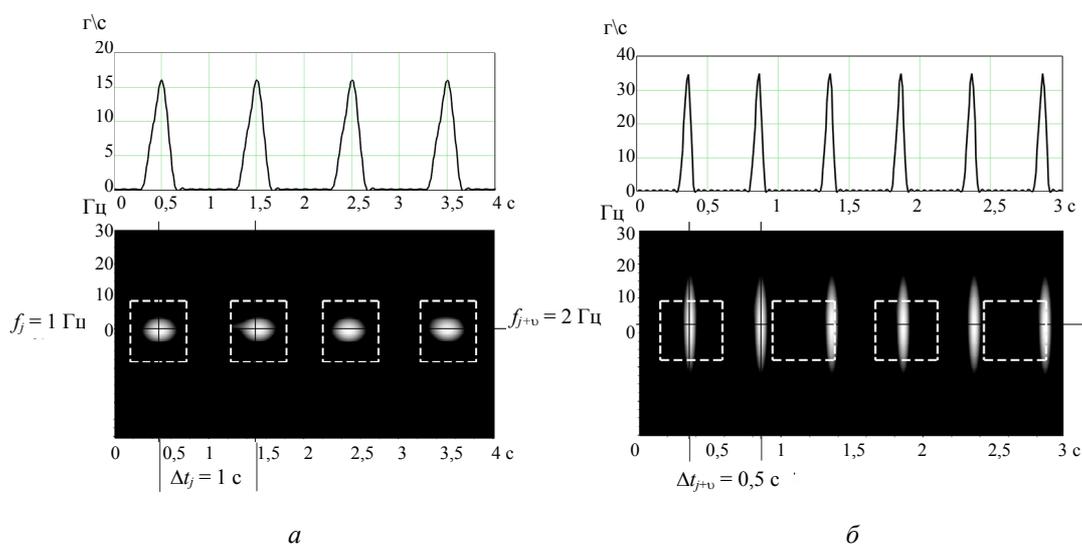


Рис. 3. Осциллограммы и их время-частотные карты, соответствующие номинальному (а) и текущему (возмущенному) (б) режимам работы дозатора порционного типа

Для НДУ спирального и шнекового типа такие распределения со стабильной частотой представляют собой тонкие по частоте (по оси ординат) и вытянутые по времени (по оси абсцисс) время-частотные атомы (ВЧА) карты Вигнера. Поэтому в реальных условиях работы дозаторов на вейвлет-карте (W -карте) происходит спорадический выход (девиация) того или иного ВЧА (для НДУ) или группы атомов (для ДДУ) за границы фрейма/фреймов. При этом автоматизированной системой фиксируется очередность нарушения номинальных режимов тех или иных ДУ. Поэтому время обработки W -карты соответствующего ДУ должно быть меньше промежутка времени между актами возникновения двух смежных по времени девиаций ВЧА за границы фреймов двух каких-либо разных ДУ либо того же дозатора.

Экспериментально установлено, что такие временные промежутки (t -гэпы) обычно составляют не менее 20 периодов для НДУ (при $T = 0,5-1,0$ с это составит 10–20 с) и 15 периодов для ДДУ (при $T_{\max} = 1,0$ с, т. е. $f_{\min} = 1$ Гц, это равно 15 с; для 10-й гармоники имеем 10 Гц, при этом t -гэп составит 1,5 с). Подобная оценка распределений случайной величины « t -гэп» для обоих типов ДУ произведена в терминах отображения квартильных распределений в формате «Box&Whiskers». Следовательно, тактовая частота CPU современного PC, используемого в автоматизированной системе для обработки сигналов, может быть сколь угодно малой.

При фиксации недопустимой девиации ВЧА за границы фреймов начинает действовать технология модального управления.

Управление процессами дозирования в автоматизированной системе производится в вейвлет-среде на основе алгоритма модального управления. Цель алгоритма – стабилизировать процесс дозирования на предсмесительной стадии на номинальном уровне при флуктуациях выходных потоков вследствие спорадических ступенчатых или частотно-время-зависимых изменений входных воздействий на дозаторы.

Суть проектирования системы модального управления заключается в синтезе замкнутой системы автоматического управления (ЗСАУ) с обратной связью (ОС) по полному вектору состояния путем задаваемого размещения полюсов объекта с последующим определением матрицы ОС (модального регулятора), формирующей задаваемую локализацию созвездия полюсов.

Задача синтеза заключается в определении желаемого положения корней характеристического уравнения системы и нахождении коэффициентов K_i (параметров модального регулятора), обеспечивающих заданное размещение корней (см. раздел «Алгоритм пересчета матрицы (параметров) модального регулятора K »).

Модель блока ДУ, состоящего из двух дозаторов – спирального и порционного дискретного (последний формирует материалопоток, задаваемый функцией расхода П-образного вида со скажностью $\lambda = T / \tau = 2$, где T – период дозирования; τ – длительность формирования дозы), – задается соответствующими импульсными переходными функциями. В редуцированном M -графе (сигнальном графе Мэйсона) [1, 3] отражены все составляющие изображений сигналов, что позволяет промоделировать полученную структуру в любой инструментальной системе (здесь моделирование проведено в пакете Classic).

Результаты моделирования и исследования реальных режимов работы автоматизированной системы модального управления процессом дозирования

Так как бункерные емкости каждого ДУ заполнены материалами исходных ингредиентов, обладающими в каждой емкости различными объемными физико-механическими свойствами (например, влажностными характеристиками и/или степенью однородности по своему составу), в процессе дозирования происходит спорадическое варьирование воздействия материала дозируемого ингредиента на входную (заборную) часть активного органа соответствующего дозатора. Вследствие этого происходит смена частоты дозирующего сигнала (т. е. частоты вращения исполнительного механизма (ИМ) дозатора ДУ) в переходном режиме, что в итоге приводит процесс дозирования к новому установившемуся частотному режиму, который не соответствует номинальному, требуемому на предсмесительной стадии.

При поступлении более однородного и сухого (менее увлажненного) вещества ИМ ДУ раскручивается благодаря сбросу нагрузки на рабочий орган дозатора, а частота сигнала материалопотока при этом возрастает до тех пор, пока не стабилизируется на новом установившемся уровне с новой, ненормальной, производительностью. При повышении же нагрузки на рабочий орган ДУ картина противоположна. В том и другом случаях требуется воздействовать на замкнутую САУ (ЗСАУ) с модальным управлением с целью стабилизации материального потока на номинальном уровне. Но поскольку воздействие на входе и реакция на выходе ДУ уже стабилизировались на новом уровне, требуется воздействовать на внутреннюю структуру ЗСАУ таким образом, чтобы изменить параметрические свойства системы. Таким образом, требуется создать эффект принудительной параметрической нестационарности за счет смены локализации «созвездия» полюсов ЗСАУ.

Следовательно, при раскрутке ИМ ДУ (т. е. при повышении частоты сигнала в результате L -сброса на рабочий орган ДУ) необходимо – с целью стабилизации режима расхода на номинальном уровне – снизить общий коэффициент передачи ЗСАУ, а также перманентно уменьшать значение мнимой сопряженной пары полюсов (для НДУ) в ходе переходного процесса (ПП). Что касается обратного ПП дозирования в ПДУ, то снижать значение мнимых полюсов следует только для наиболее мощных субгармоник первой гармоники Фурье-модели. Модель при этом имеет вид $B_1 \sin \omega_1 t + A_1 \cos \omega_1 t$. Режекция высших гармоник выполняется средствами низкочастотной фильтрации или с помощью высокочастотного режекторного фильтра.

При реализации обратного ПП после L -наброса средствами модального управления восстановление номинального режима дозирования производится по двухэкспоненциальной зависимости вида

$$x(t)_{b/ei} = x(t)_{0b/ei} + x(t)_{mb/ei} \sin[2\pi f_{var}(t - \tau_b) - \varphi_0],$$

где $f_{var} = f_b [1(t - \tau_b)] + (f_e - f_b) ([1(t - \tau_e)] - \exp[-(t - \tau_b)/T_3] T_3 / (T_3 - T_4) + \exp[-(t - \tau_b)/T_4] T_4 / (T_3 - T_4))$ – изменение частоты chirp-сигнала [5] восходящего обратного ПП; индексы b и e обозначают начало и конец переходного процесса; i – номер дозатора; $x(t)_{mb/ei} = x_{mbi} - t / T$; $\tau_b \leq t \leq \tau_e$ – изменение амплитуды переменной составляющей ВОПП; $x(t)_{0b/ei} = x_{0bi} [1(t - \tau_b)] + (x_{0ei} - x_{0bi}) ([1(t - \tau_e)] - \exp[-(t - \tau_b) / T_3] T_3 / (T_3 - T_4) + \exp[-(t - \tau_b) / T_4] T_4 / (T_3 - T_4))$ – изменение аperiodической составляющей восходящего обратного ПП.

Таким образом, полный график переходных процессов при двух циклах варьирования нагрузки (L -наброса и L -сброса), включающий нисходящий прямой/восходящий обратный переходные процессы (последний восстанавливает номинальный режим дозирования), а также восходящий прямой ПП (ВПП) и нисходящий обратный ПП (НОПП), имеет вид (рис. 4):

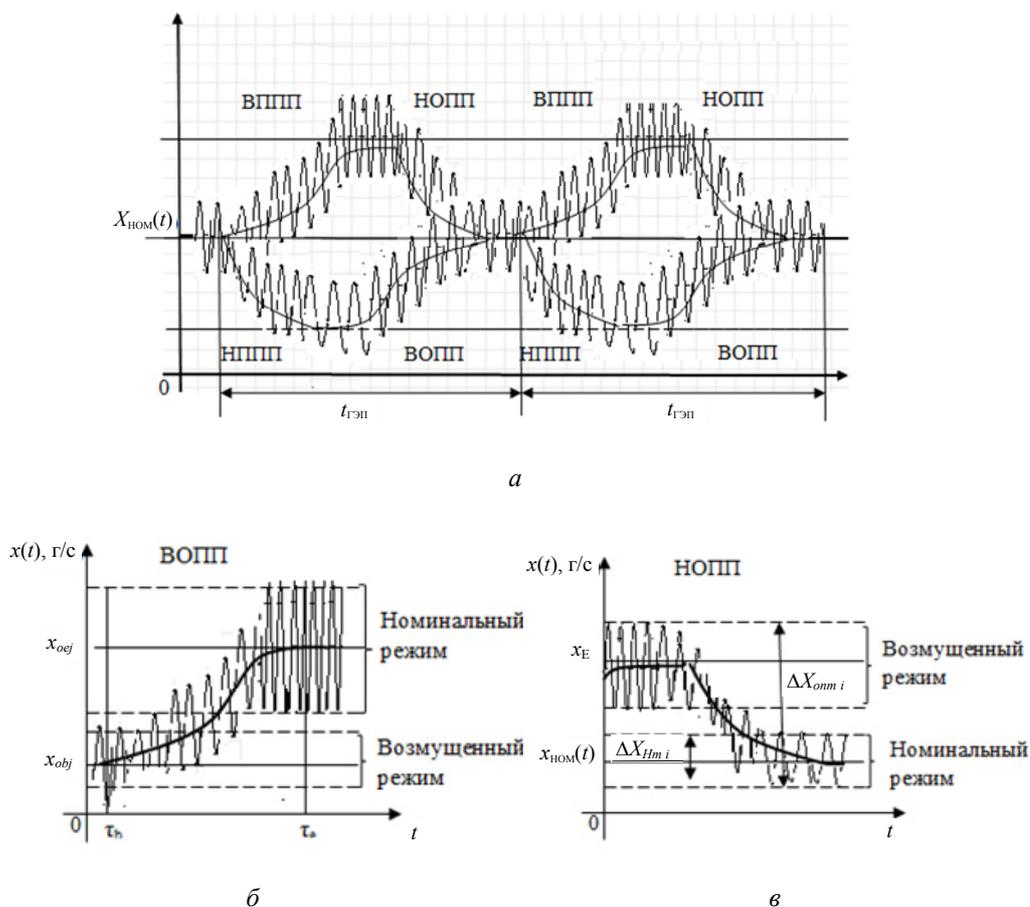


Рис. 4. Циклы модального управления процессом дозирования при L -набросе и L -сбросе: два цикла ПП (а); ВОПП – сигнал расхода в ходе восходящего обратного ПП (б); НОПП – сигнал расхода при нисходящем обратном ПП (в); НППП – нисходящий прямой ПП

На вейвлет-карте восходящий обратный переходный процесс (ВОПП) для ДУ непрерывного действия после L -наброса отображается в виде распределения Вигнера (рис. 5).

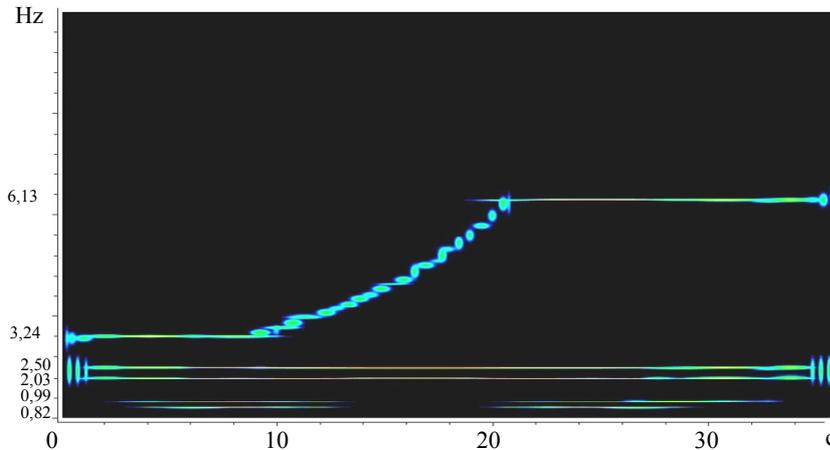


Рис. 5. Время-частотное отображение восходящего обратного переходного процесса, восстанавливающего требуемый режим дозирования (частота дозирования $f(t)_{var} = 3,24 \div 6,13$ Гц)

Для демонстрации разрешающей способности W -карт на рис. 6 представлены осциллограмма регистрируемого материалопотокового сигнала и ее W -карта (карта Вигнера) для БДУ, состоящего из одного порционного, двух спиральных, работающих непрерывно, с рабочими частотами 0,20; 3,23 и 4,02 Гц, и спирального дозатора, функционирующего дискретно во времени с заполняющей в пределах интервала дозы частотой 6,89 Гц и частотой дозирования 0,077 Гц.

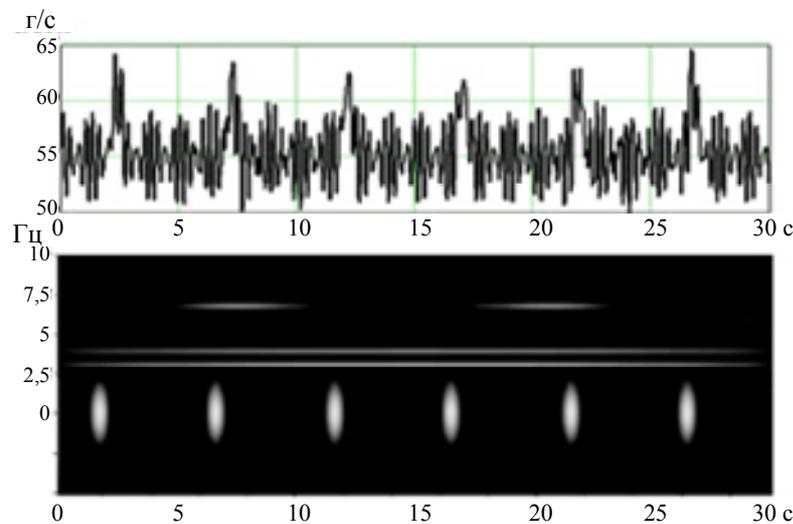


Рис. 6. Материалопотоковый сигнал БДУ и его отображение на W -карте Вигнера

На рис. 7, a показана осциллограмма сигнала расхода ПДУ в виде chirp-сигнала с время-зависимой мгновенной падающей частотой в режиме наброса (увеличения) нагрузки, который в аналитическом виде может быть записан следующим образом:

$$x(t) = F(A_0, A_k, B_k, \omega_k),$$

$$\text{где } A_0 = \frac{2 X_{d \max}}{\lambda}; \quad A_k = \frac{X_{d \max}}{k \cdot \pi} \left(\sin \left(\frac{2k\pi}{\lambda} \right) \right); \quad B_k = \frac{2 X_{d \max}}{k \cdot \pi} \left(\sin \left(\frac{k\pi}{\lambda} \right) \right)^2; \quad \omega_k = \frac{2\pi k}{T}.$$

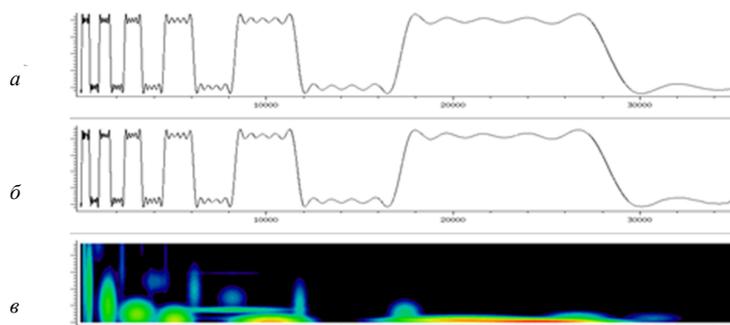


Рис. 7. Динамика сигналов порционного дозирующего устройства в режиме наброса нагрузки в одномерном и многомерном виде: исходный сигнал расхода (а); сигнал, восстановленный по спектральным составляющим в виде вейвлет-ряда (б); время-частотное распределение сигнала (в)

После разложения сигнала по алгоритму вейвлет-поиска соответствия [1, 5] получаем его время-частотное распределение (рис. 7, в), адекватность которого установлена путем сравнения исходного сигнала (рис. 7, а) с восстановленным по спектральным составляющим (рис. 7, б). При этом ошибка аппроксимации сигнала расхода в максимуме и на паузе составляет менее 4,3 %, а в точках Гиббса (в точках разрыва первого рода) – 8,9–9,2 %.

Рис. 8 демонстрирует материалопотоковый сигнал двух дозаторов непрерывного действия, работающих в режимах наброса и сброса нагрузки, реконструированный по ВПС-алгоритму сигнал, ошибку аппроксимации и карту Вигнера данного процесса.

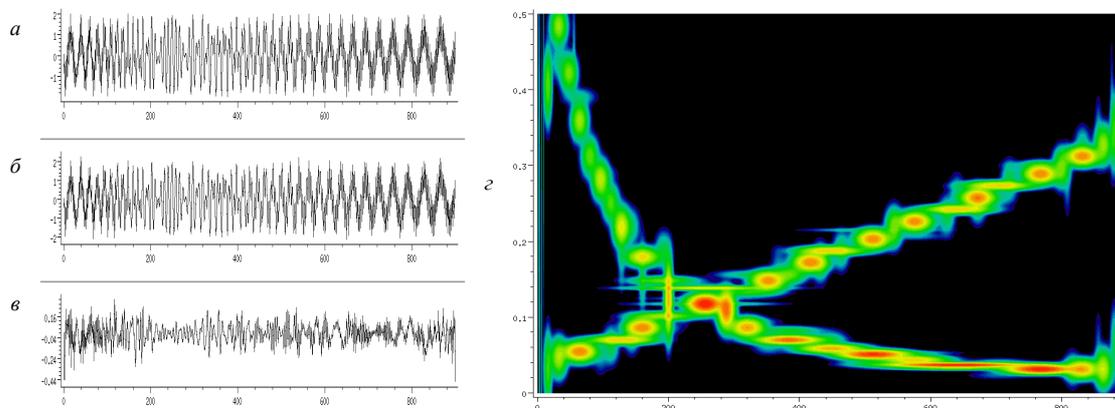


Рис. 8. Переходные режимы работы двух дозаторов непрерывного действия при набросе и сбросе нагрузки: одномерный суммарный сигнал расхода (а); его аппроксимация по ВПС-алгоритму (б); ошибка аппроксимации (в); многомерные распределения на W -карте (г)

На карте Вигнера этого режима ниспадающая цепочка время-частотных атомов соответствует прямому переходному процессу (НППП) при набросе нагрузки в одном дозаторе, а восходящая цепочка – прямому переходному процессу (ВППП) в другом.

Следует отметить, что все переходные процессы (ПП) в объектах (ДУ) являются параметрически нестационарными, т. е. протекают с время-зависимыми мгновенными частотами в виде так называемых чирп-сигналов. При этом нестационарность определяется частотой f_{var} ПП и меняющейся амплитудой X_{mvar} переменной составляющей процесса. Первый параметр меняется под действием непрерывно варьируемых полюсов S_{p2} и S_{p3} (мнимых сопряженных), а второй параметр X_{mvar} – в зависимости от соотношения f_{var} и постоянных времени в произвольный момент.

Алгоритм пересчета матрицы (параметров) модального регулятора K

Процедура реализации алгоритма модального управления процессом дозирования, в том числе технология принудительной локализации и релокации полюсов разомкнутой САУ в условиях нестационарных процессов в системе «исполнительный механизм – ДУ» (ИМ – ДУ), рассмотрена на примере НДУ в возмущенном режиме при сбросе нагрузки (при переходном процессе типа НОПП). Подобную процедуру целесообразно применять и в многомерно-точечных системах, использующих вейвлет-среду как средство эффективного отображения одномерных сигналов. Расчет параметров модального регулятора, т. е. определение матрицы обратной связи K по полному вектору переменных состояния, сводится к ее расчету по формуле Аккермана [9]

$$K = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \cdot Q_c^{-1} \cdot \alpha(A),$$

где Q_c^{-1} – обратная матрица управляемости; $\alpha(A)$ – матричный полином, сформированный согласно теореме Кэйли-Хэмилтона [2, 3].

Желаемый характеристический полином определяется по формуле $\alpha(s) = s^4 - d_1 s^3 + d_2 s^2 - d_3 s + d_4$, где $d_1 = (s_{p1} + s_{p2} + s_{p3} + s_{p4})$, где s_{pj} – полюсы объекта; $d_2 = [s_{p1} s_{p2} s_{p3} x (s_{p1} + s_{p2}) + s_{p4} \times (s_{p1} + s_{p2} + s_{p3} + s_{p4})]$; $d_3 = [s_{p1} s_{p2} s_{p3} + s_{p1} s_{p2} s_{p3} s_{p4} (s_{p1} + s_{p2})]$; $d_4 = s_{p1} s_{p2} s_{p3} s_{p4}$.

Следовательно, матричный полином имеет вид $\alpha(A) = A^4 - d_1 A^3 + d_2 A^2 - d_3 A + d_4 I$, где I – единичная матрица.

$$\alpha(A) = \begin{bmatrix} 0 & -T^{-1}\omega^2 + 1 & -\omega^2 + 1 & -T^{-1} + 1 \\ 0 & -\omega^2(T^{-2} + T^{-1}) & -\omega^2 + 1 & (-\omega^2 + 1) + (T^{-2} - T^{-1}) \\ 0 & \omega^4 T^{-1} - \omega^2(T^{-2} + T^{-1}) & \omega^2(\omega^2 - 1) & \omega^2(T^{-1} - 1) - T^{-3} + (T^{-2} - T^{-1}) + 1 \\ 0 & \omega^2(\omega^2 - 1)(T^{-2} + T^{-1}) & \omega^2(\omega^2 - 1) & \omega^2(\omega^2 - T^{-2}) - \omega^2(T^{-1} - 1) + T^{-4} - T^{-3} + (T^{-2} - T^{-1}) \end{bmatrix}.$$

По виду $\alpha(A)$ нетрудно заметить, что в системе РСАУ влияние на переходный процесс имеют полюсы s_{p2} , s_{p3} и s_{p4} (два мнимых сопряженных и вещественный отрицательный), соответствующие параметрам ω и T , которые создают частотную составляющую и определяют быстроедействие переходного процесса.

В результате получаем матрицу K модального регулятора вида

$$K = [0 \ 0 \ 0 \ 1] Q_c^{-1} \alpha(A) = [0 \ |(T^{-1}\omega^2 - 1)| \ |(\omega^2 - 1)| \ |(T^{-1} - 1)|] = [K_1 \ |K_2 \ |K_3 \ |K_4].$$

Данная матрица непрерывно пересчитывается в реальном масштабе времени с произвольным шагом миллисекундного диапазона в ходе переходного процесса, чтобы обеспечить его время-частотный (чирп-) характер.

По аналогичным процедурам автоматизированная система рассчитывает параметры модального регулятора для любого ДУ или блока дозаторов.

Полученные параметры позволяют задавать требуемые нестационарные полюсы замкнутой САУ с полной обратной связью по состоянию, которые определяет автоматизированная система модального управления по разработанному алгоритму.

Таким образом, разработанная автоматизированная система модального управления процессами дозирования выполняет функции стабилизации номинального режима работы БДУ на предсмесительной стадии, что способствует получению смесей высокого качества.

Заключение

1. Разработаны математические модели процессов дозирования в терминах технологического пространства состояний блока дозирующих устройств, с помощью которых можно эффективно обрабатывать широкий спектр текущих режимов мультиингредиентного дозирования устройствами непрерывного и дискретного действия.

2. Сформирована и отработана концепция способа модального управления расходом блока дозирующих устройств (объекта управления) на базе теории пространства состояний в сочетании с аппаратом вейвлет-преобразований, реализованная в замкнутой системе регулирования на основе принудительной параметрической нестационарности обратной связи по состоянию. В условиях спорадического нарушения номинальных потоков дозирования, возникающего вследствие изменения входных воздействий, это позволяет варьировать вектор внутренних параметров объекта, приводя выходные потоки последнего к требуемому состоянию.

3. Представлен алгоритм динамического пересчета параметров многомерной обратной связи по состоянию объекта управления в ходе процесса дозирования (в режиме реального времени), обеспечивающий стабильность материалопотока на предсмесительной стадии.

4. В качестве базовых – при проведении моделирования, расчетов и при обработке сигналов и их отображений – использованы вейвлет-функции Габора, адекватно соответствующие характеру технологических сигналов в подсистеме дозирования и в системе смесеприготовления в целом.

5. Испытания разработанной автоматизированной системы модального управления процессом дозирования показали, что она позволяет интенсифицировать процесс смесеприготовления за счет гармонизации материалопотоков на предсмесительной стадии на базе модального управления в пространстве состояний и вейвлет-преобразований, а также повысить точность дозирования по сравнению с существующими производственными системами. Последний фактор ведет к снижению коэффициента неоднородности конечных смесей, т. е. к повышению их качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосенков Б. А. Научно-технические основы создания и моделирования автоматизированных систем управления непрерывными смесеприготовительными процессами: автореф/ дис. ... д-ра техн. наук. М.: Издат. комплекс МГУПП, 2005. 55 с.
2. Ким Д. П. Теория автоматического управления. М.: Физматлит, 2004. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. 464 с.
3. Филлипс Ч. Л., Харбор Р. Д. Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. 616 с.
4. Федосенков Д. Б., Симикина А. А., Федосенков Б. А. Синтез системы модального управления блоком дозирующих устройств // Машиностроение: инновационные аспекты развития: материалы Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: СПбФ НИЦ МС, 2019. № 2. С. 162–163.
5. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. 673 с.
6. Cohen L. Time-frequency analysis. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995. 299 p.
7. Auger F., Chassande-Mottin E. Quadratic time-frequency analysis I: Cohen's class // Time-frequency analysis: concepts and methods. ISTE. 2008 (January). P. 131–163.
8. Debnath L. Recent development in the Wigner-Ville distribution and time-frequency signal analysis // PINSA. 2002, (January). 68, A. N. 1. P. 35–56.
9. Ackermann J. E. Der Entwurflinerer Regelungssysteme // Zustandsraum, Regelungstechnik und Prozessdaten Verarbeitung. 1972. N. 7. P. 297–300.

Статья поступила в редакцию 22.08.2019

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федосенков Денис Борисович – Россия, 115054, Москва; Сибирская генерирующая компания; канд. техн. наук, доцент; начальник отдела управления активами; fedosenkovDB@sibgenco.ru.

Симикина Анна Алексеевна – Россия, 650000, Кемерово; Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева; старший преподаватель кафедры информационных и автоматизированных производственных систем; simikovaanna@mail.ru.

Федосенков Борис Андреевич – Россия, 650000, Кемерово; Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры информационных и автоматизированных производственных систем; rafwaveletsve@mail.ru.



MODAL CONTROL OF FEEDING PROCESSES IN THE MEDIUM OF STATE SPACE AND WAVELET TRANSFORMS

D. B. Fedosenkov¹, A. A. Simikova², B. A. Fedosenkov²

¹ *Siberian Generating Company,
Moscow, Russian Federation*

² *T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
Kemerovo, Russian Federation*

Abstract. The article presents the essential aspects of designing and operational functioning of computer-aided modal control systems, using the example of a control system for feeding processes in a mixture-producing set. The object of study is the structure of feeding devices unit and transient processes during feeding. The subjects of research are the issues of designing and creating a computer-aided modal control system (CMCS) which operates in the mode of tunable parametrically non-stationary in frequency transient processes (TP). In this case, the scalar signals of the feeding devices (FD) material flows are formed in terms of the state space method (in the format of the internal models “input-state-output”), and monitoring of such processes is carried out in the time-frequency wavelet medium. The latter makes it possible to analyze the processes occurring in the CMCS at a semantically transparent and information-saturated level. The parameters (pulse signal off-duty ratios) of the Fourier model for the signals of a discrete-type feeder are presented, on which the nature of the dosing process depends. A model of the feeders unit is formed in terms of the state space. The 1D-flow rate signals and their representations in the form of time-frequency distributions (W-maps) are considered. A new concept was developed for flow rate modal control of the feeding devices unit in the frame of the mixture-producing set by introducing the definition of parametric non-stationary state of the feeding devices internal environment that takes into account the real-time variation of the multidimensional state feedback coefficient during transients in the system and for the purpose of experimental estimation of transients parameters (here: time constants), they are determined by flow signal distributions on W-maps. The wavelet medium used in the system deals with Cohen’s class time-frequency distributions (Wigner-Ville and Choi-Williams transformations). The combination of TP-models in terms of the state space and their representation in the Wigner distribution format allows one to evaluate, set and reassign the parameters of the internal structure of the object controlled (a separate feeder or feeding devices unit) in real time in order to achieve the effect of stabilizing the ingredients flow rate in a rated mode at pre-mixing stage. The transient modes are presented in the form of processes restoring the rated modes (the so-called reverse TP). A procedure has been developed and described for the implementation of a modal control algorithm for the feeding process, including the technology of forced localization and relocalization of the object poles under non-stationary processes in the “Executive mechanism-FD” system, using the example of a continuous-type feeder in a transient mode on load decrease (with a downward reverse transitional process). For this mode, the calculation of the non-stationary matrix of the modal controller is presented.

Key words: modal control, transient processes on load increase and decrease, parametrically non-stationary chirp-signals, time-frequency wavelet medium, Wigner distribution, W-map, modal controller matrix.

For citation: Fedosenkov D. B., Simikova A. A., Fedosenkov B. A. Modal control of feeding processes in the medium of state space and wavelet transforms. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2019;4:46-58. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2019-4-46-58.

REFERENCES

1. Fedosenkov B. A. *Nauchno-tekhicheskie osnovy sozdaniya i modelirovaniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya nepreryvnymi smeseprigotovitel'nymi protsessami. Avtoreferat dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Scientific and technical fundamentals for creating and modeling computer-aided control systems for continuous mixing processes. Diss.Abstr... Dr.Tech.Sci.]. Moscow, Izdat. kompleks MGUPP, 2005. 55 p.

2. Kim D. P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automation control]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. Vol. 2. Mnogomernye, nelineinye, optimal'nye i adaptivnye sistemy. 464 p.
3. Phillips Ch. L., Harbor R. D. *Sistemy upravleniya s obratnoi svyaz'yu* [Feedback control systems]. Moscow, Laboratoriya bazovykh znaniy Publ., 2001. 616 p.
4. Fedosenkov D. B., Simikova A. A., Fedosenkov B. A. Sintez sistemy modal'nogo upravleniya blokom doziruyushchikh ustroystv [Synthesis of modal control system for metering unit]. *Mashinostroyeniye: innovatsionnye aspekty razvitiya: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Saint-Petersburg, SPBF NITs MS, 2019. No. 2. Pp. 162-163.
5. Mallat S. *Veivlety v obrabotke signalov* [A wavelet tour of signal processing]. Moscow, Mir Publ., 2005. 673 p.
6. Cohen L. *Time-frequency analysis*. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1995. 299 p.
7. Auger F., Chassande-Mottin E. Quadratic time-frequency analysis i: Cohen's class. *Time-frequency analysis: concepts and methods*. ISTE, 2008 (January). Pp. 131-163.
8. Debnath L. Recent development in the Wigner-Ville distribution and time-frequency signal analysis. *PINSA*, 2002, January, 68, A, no. 1, pp. 35-56.
9. Ackermann J. E. Der Entwurf linearer Regelungssysteme. *Zustandsraum, Regelungstechnik und Prozessdaten Verarbeitung*, 1972, no.7, pp. 297-300.

The article submitted to the editors 22.08.2019

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedosenkov Denis Borisovitch – Russia, 115054, Moscow; Siberian Generating Company; Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; Chief of the Department of Assets Administering; fedosenkovDB@sibgenco.ru.

Simikova Anna Alekseyevna – Russia, 650000, Kemerovo; T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; Senior Lecturer of the Department of Information and Computer-Aided Manufacturing Systems; simikovaanna@mail.ru.

Fedosenkov Boris Andreyevitch – Russia, 650000, Kemerovo; T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; Dr. Sc; Professor; Professor of the Department of Information and Computer-Aided Manufacturing Systems; rafwaveletsve@mail.ru.

