

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ БРАГОРЕКТИФИКАЦИИ СПИРТОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

В.Г. Рубанов, А.Г. Филатов, Ю.В. Касьянов, А.А. Руднев

Проведен анализ суточных колебаний режимных параметров эпорационной колонны и доказано, что наблюдаемые в системе дефлегматор – конденсатор шумоподобные колебания имеют не стохастическую, а детерминированную природу и обусловлены хаотическим характером динамики процесса. Разработана система стабилизации расхода эфира-альдегидной фракции в составе автоматизированной системы управления процессом брагоректификации, учитывающая выявленные особенности динамики объекта управления.

Введение

Наметившаяся в последнее время напряженность энергетического баланса, связанная с ограниченностью запасов топливно-энергетических ресурсов, вызвала необходимость проведения энергосберегающей политики во всех отраслях народного хозяйства. Учитывая важность проблемы ресурсосбережения, Белгородским технологическим университетом совместно с Веселолопанским спиртовым заводом была разработана и внедрена автоматизированная система управления процессом (АСУП) брагоректификации, которая при достаточно простой и надежной структуре с ограниченным числом локальных контуров регулирования обеспечивает получение спирта-ректификата требуемого качества при минимальных энергетических затратах [1].

Промышленная эксплуатация иерархической системы автоматизации управления, включающей на нижнем уровне исполнительные механизмы и устройства сбора информации о режиме функционирования технологического комплекса, на среднем уровне – цифровые контроллеры, реализующие локальные контуры стабилизации параметров технологического процесса, на верхнем уровне – автоматизированное рабочее место оператора системы с супервизорным управлением, показала высокую технико-экономическую эффективность.

Однако, несмотря на полученную ощутимую выгоду в виде повышения производительности до 7–10%, экономии энергетических затрат до 12%, уменьшения

фактических потерь спирта до 0,01%, детальный анализ динамики внедренной системы автоматизации выявил отдельные недостатки качества стабилизации технологических режимов брагоректификационной установки. В частности, реализованная на подчиненном уровне АСУП подсистема стабилизации расхода эфи́ро-альдегидной фракции (ЭАФ) э́пюрационной колонны, входящей в состав трехколонной брагоректификационной установки косвенного действия [2], не дала ожидаемых результатов в виде снижения колебаний расхода ЭАФ.

1. Система автоматизации процесса ректификации бражного дистиллята

Технологическая схема работы э́пюрационной колонны представлена на рис. 1. Бражный дистиллят *1* поступает на питающую тарелку э́пюрационной колонны *2*. В нижней извлекающей части колонны *3* производится выделение высококипящих компонентов, в том числе этанола, а в верхней *4* – концентрирование головных низкокипящих компонентов, то есть ЭАФ. Пары бражного дистиллята *5*, обогащенные ЭАФ, поступают в дефлегматор *6*. В дефлегматоре происходит неполная конденсация паров, отводимых из верхней части колонны, за счет чего достигается дополнительное обогащение продукта низкокипящими компонентами. Полученный конденсат в виде флегмы *7* поступает на орошение колонны. Оставшаяся часть паров поступает в конденсатор *8*, где происходит их окончательная конденсация.

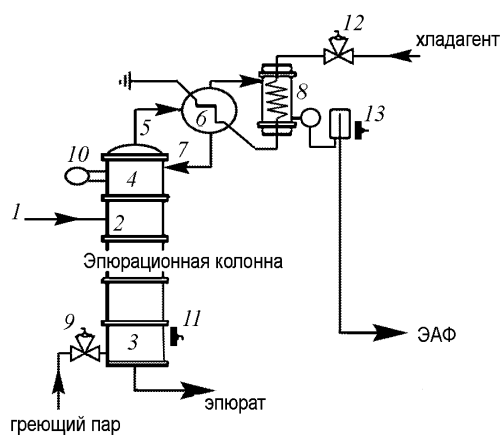


Рис. 1. Технологическая схема работы э́пюрационной колонны

В отличие от схемы с полной конденсацией, в которой функции дефлегматора и конденсатора совмещаются в одном устройстве, подобная технологическая схема с парциальной (частичной) конденсацией дистиллята в дефлегматоре и дальнейшей окончательной конденсацией паров в конденсаторе является наиболее экономичной и эффективной при использовании воды для охлаждения дефлегматора и конденсатора, фактически самого дешевого хладагента [3]. Однако это накладывает повышенные требования к качеству процесса стабилизации расхода ЭАФ. Подсистема управления э́пюрационной колонной в составе АСУТП, обеспечивающая стабильный режим работы э́пюрационной колонны, включает два контура: контур управления расходом греющего пара, формирующий управление клапаном расхода пара *9* на основе сигналов датчиков температуры верха колонны *10* и давления низа колонны *11*, и контур управления расходом ЭАФ, формирующий управление клапаном расхода хладагента *12* на основе сигнала датчика уровня эпюрата в стакане импульсного преобразователя расхода *13*, который, соответственно, условно пропорционален расходу ЭАФ. Расход ЭАФ стабилизируется за счет регулирования расхода охлаждающей воды, подаваемой в систему конденсатор – дефлегматор.

Следовало ожидать, что реализация контуров стабилизации режимных параметров позволит скомпенсировать негативное влияние случайных помех (температуры греющего пара, температуры хладагента, температуры, расхода и состава поступающего в колонну бражного дистиллята и т. д.) на ход технологического процесса. Однако стабилизировать удалось только тепломассообменный режим непосредственно эшюрационной колонны. Ожидаемой абсолютной стабилизации расхода ЭАФ, как уже было упомянуто выше, не произошло.

Поэтому авторами была выдвинута гипотеза о том, что наблюдаемые в системе шумоподобные колебания расхода ЭАФ, которые не удалось ликвидировать за счет ввода в эксплуатацию соответствующей подсистемы стабилизации, обусловлены, главным образом, не влиянием совокупности случайных помех, а сложной нелинейной динамикой самого процесса парциальной конденсации, протекающей в системе конденсатор – дефлегматор. Данное предположение является логичным, поскольку:

- классические методы теории автоматического управления, широко используемые при построении систем стабилизации, дают удовлетворительные результаты (чего, соответственно, не произошло) в случае, если колебания регулируемых величин обусловлены преимущественно случайными воздействиями на объект управления, то есть носят стохастический характер;

- следует ожидать, что динамика системы дефлегматор – конденсатор будет качественно напоминать динамику известной системы Лоренца [4], поскольку при описании процессов, протекающих в данной системе, будут использоваться те же уравнения математической физики, как-то: уравнения Навье – Стокса, теплопроводности и неразрывности, дополненные уравнениями, описывающими динамику процесса конденсации.

2. Анализ шумоподобных колебаний в системе дефлегматор – конденсатор

Гидродинамика дефлегматоров и конденсаторов, которые представляют собой сложные конструкции в виде кожухотрубных теплообменников, практически не поддается аналитическому описанию со степенью точности, необходимой для исследования условий возникновения в системе нелинейных непериодических колебаний, поскольку существующие математические модели подобных тепломассообменных аппаратов, основанные на балансовых, диффузионных и критериальных уравнениях, являются либо упрощенными и пригодными только для инженерных расчетов статических установившихся режимов работы, либо неразрешимыми аналитически и требующими для своего использования методов имитационного моделирования [3].

Поэтому, для того чтобы выяснить природу наблюдаемых в системе шумоподобных колебаний – действительно ли они не имеют стохастического происхождения, а являются проявлением в системе детерминированного хаоса, был проведен численный анализ временных рядов, представляющих суточную выборку значений параметров, характеризующих динамику эшюрационной колонны: давления в кубовой части колонны, расхода охлаждающей воды в системе дефлегматор – конденсатор, уровня эшюрата в стакане конденсатора (рис. 2).

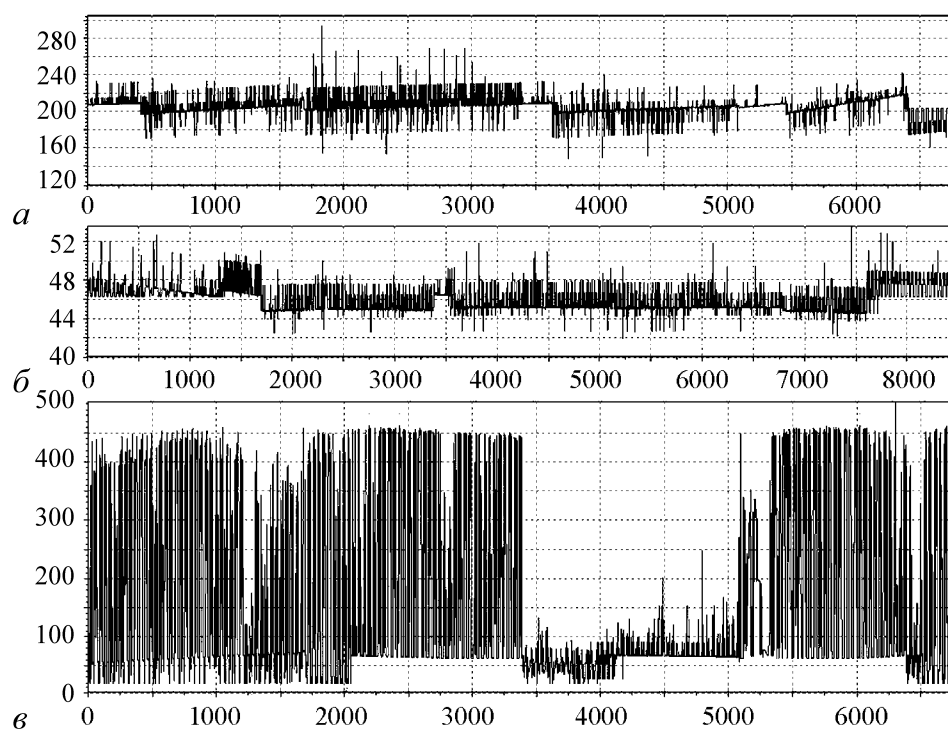


Рис. 2. Графики режимных параметров элюационной колонны: *a* – давление кубовой части элюационной колонны, кПа; *б* – расход воды в системе дефлегматор – конденсатор, дм^3 ; *в* – уровень элюрата в стакане конденсатора, мм

Вышеуказанные временные ряды получены в результате дискретизации экспериментальных данных, представляющих собой графики динамики режимных параметров элюационной колонны. Измерение экспериментальных данных и автоматическое построение графиков проводилось в течение 24-х часов при помощи контрольно-измерительных приборов с записью типа КСП-3П. Шаги дискретизации по уровню и по времени определялись исходя из максимальной точности контрольно-измерительной аппаратуры. Дискретизация экспериментальных данных выполнялась с шагом квантования по времени 10 секунд и шагами квантования по уровню для давления в кубовой части колонны 1 кПа, расхода охлаждающей воды в системе дефлегматор – конденсатор $0.01 \text{ м}^3/\text{час}$, по уровню элюрата в стакане конденсатора 1 мм.

Построим изображения Пуанкаре вышеуказанных временных рядов, характеризующих динамику элюационной колонны, в пространстве состояний (x, y, z) , где положение изображающей точки временного ряда x_1, x_2, \dots, x_n в момент времени $i = 1 \dots N - 2$ определяется как $x = x_i, y = x_{i+1} - x_i, z = x_{i+2} - x_{i+1} + x_i$. Отображение Пуанкаре временного ряда, имеющего стохастическую природу, представляет собой неупорядоченное скопление точек на фазовой плоскости. Если отображение Пуанкаре имеет четко выраженную структуру, то это свидетельствует о том, что движение носит упорядоченный характер, причем степень порядка определяется исходя из конкретного вида структуры и может лежать в пределах от линейных гармонических колебаний до детерминированного хаоса. В случае движения системы, носящего характер хаотических колебаний (именно тот случай, присутствие

которого мы хотим идентифицировать), отображение Пуанкаре имеет просматриваемые в наборе изображающих точек структурные образования фрактального характера, подобные канторовым множествам. Наличие таких визуально определяемых упорядоченных массивов точек среди беспорядочно расположенных изображающих точек временного ряда является признаком того, что движение системы носит не стохастический, а хаотический характер [5].

На рис. 3 представлены отображения Пуанкаре режимных параметров эпорационной колонны в вышеописанном пространстве состояний (x, y, z) . Анализ отображений Пуанкаре показывает, что колебания уровня эпората в стакане конденсатора носят ярко выраженный хаотический характер. Причем факт наличия структурного порядка в отображении Пуанкаре суточных колебаний уровня эпората в стакане конденсатора четко определяется визуально (рис. 3, *a, б*), что свидетельствует о ярко выраженном характере хаотических колебаний и их преобладании над стохастической составляющей в динамике процесса.

Визуальное определение структурной упорядоченности и фрактального характера отображения Пуанкаре колебаний расхода охлаждающей воды в системе дефлегматор – конденсатор эпорационной колонны (рис. 3, *в*) является сомнительным и неоднозначным. Хотя на графиках и просматриваются структуры, напоминающие

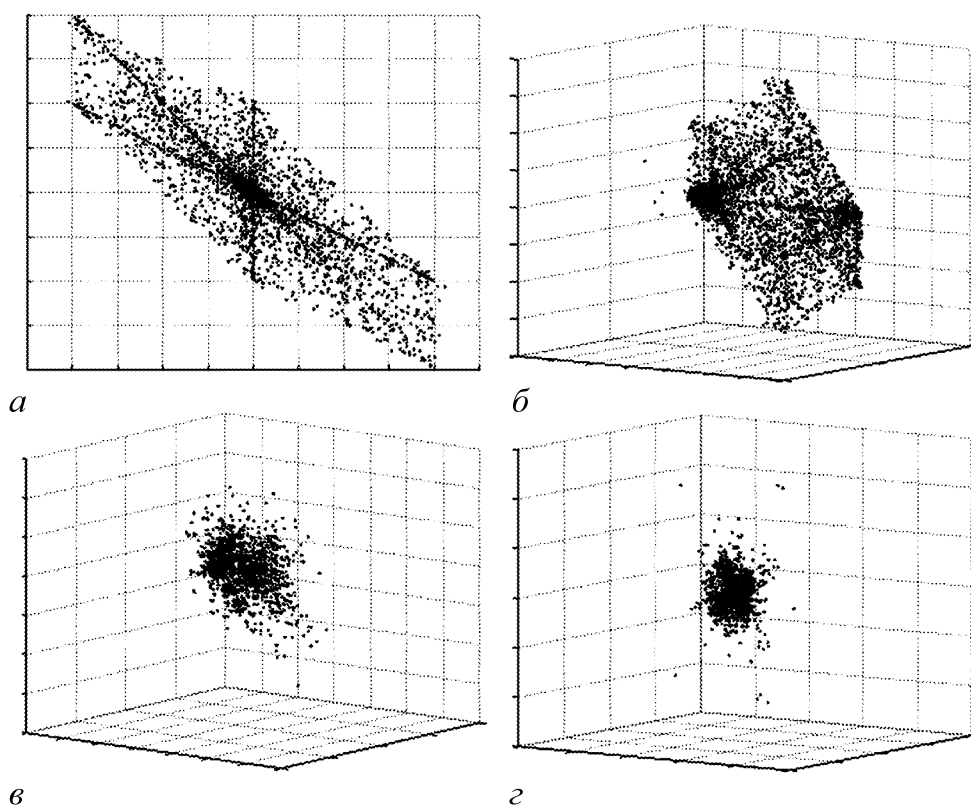


Рис. 3. Отображения Пуанкаре (x, y, z) колебаний режимных параметров объекта: *a* – сечение отображения Пуанкаре (y, z) колебаний уровня эпората; *б* – уровень эпората в стакане конденсатора; *в* – расход охлаждающей воды в системе дефлегматор – конденсатор; *г* – давление в кубовой части колонны

известную канторову пыль, для уверенной констатации хаотического характера процесса необходимо проведение численных расчетов корреляционной размерности соответствующего временного ряда. Потенциальная возможность присутствия слабо выраженной хаотической составляющей на фоне стохастических колебаний случайного характера объясняется тем, что вследствие автоматической работы контура расхода ЭАФ в системе существует обратная связь между расходом охлаждающей воды и уровнем эпората в стакане конденсатора.

Что касается давления в кубовой части эпорационной колонны, то наблюдаемые суточные колебания этих параметров, происходящие при стационарном режиме работы объекта, носят преимущественно стохастический характер, то есть их наличие вызвано, в основном, случайным воздействием большого числа неконтролируемых факторов на динамику процессов, протекающих в эпорационной колонне. Если же хаотическая составляющая и присутствует, то ее вклад в динамику процесса настолько мал, что упорядоченные структуры соответствующего отображения Пуанкаре (рис. 3, *з*) визуально не определяются, и для доказательства их фрактального характера и требуется проведение численных расчетов корреляционной размерности соответствующего временного ряда.

Для определения корреляционной размерности временных рядов, характеризующих уровень давления в кубовой части колонны, расход охлаждающей воды в системе дефлегматор – конденсатор и уровень эпората в стакане конденсатора, воспользуемся методикой, основанной на вычислении корреляционного интеграла с последующим анализом графиков корреляционной размерности [6, 7]. Построенные для различных значений вложенности фазового пространства m графики корреляционных размерностей временных рядов, соответствующих динамике уровня эпората в стакане конденсатора, расхода охлаждающей воды в системе дефлегматор – конденсатор, давления в кубовой части колонны, представлены на рис. 4.

При построении графиков корреляционной размерности применялся алгоритм box counting [7] и использовались временные ряды длиной $N = 8640$ отсчетов, что соответствует дискретизации экспериментальных данных с шагом 10 секунд в течение суток. Для каждого из временных рядов варьировалась размерность пространства вложения $m = 1, 2, \dots, 20$, и для каждого из значений размерности фазового пространства m строились графики зависимости корреляционной размерности D_c от размера ячейки разбиения фазового пространства ε . При этом принималось во внимание ограничение $D_c \leq 2 \log N$, определяющее достоверность диагностики фрактального характера множества, в лучшем случае, при десятикратном изменении масштаба представления [7], что в нашем случае дает оценку $D_c \leq 7.87$. Более строгое определение минимальной мощности выборки для достоверной диагностики фрактального характера временного ряда с использованием корреляционного интеграла и корреляционной размерности дает соотношение $M \geq 10^{2+0.4D_c}$ [8], что в нашем случае приводит к оценке $D_c \leq 4.75$. Это не противоречит оценке $D_c \approx 1.9$, полученной по экспериментальным данным для временного ряда, характеризующего динамику уровня эпората в стакане конденсатора эпорационной колонны.

Анализ графиков корреляционных размерностей показывает, что хаотический характер имеет только динамика уровня эпората, причем наблюдаемый временной ряд может быть реконструирован при помощи нелинейной динамической системы третьего порядка, о чем говорит «полочка» $D_c \approx 1.9$ на соответствующем графике

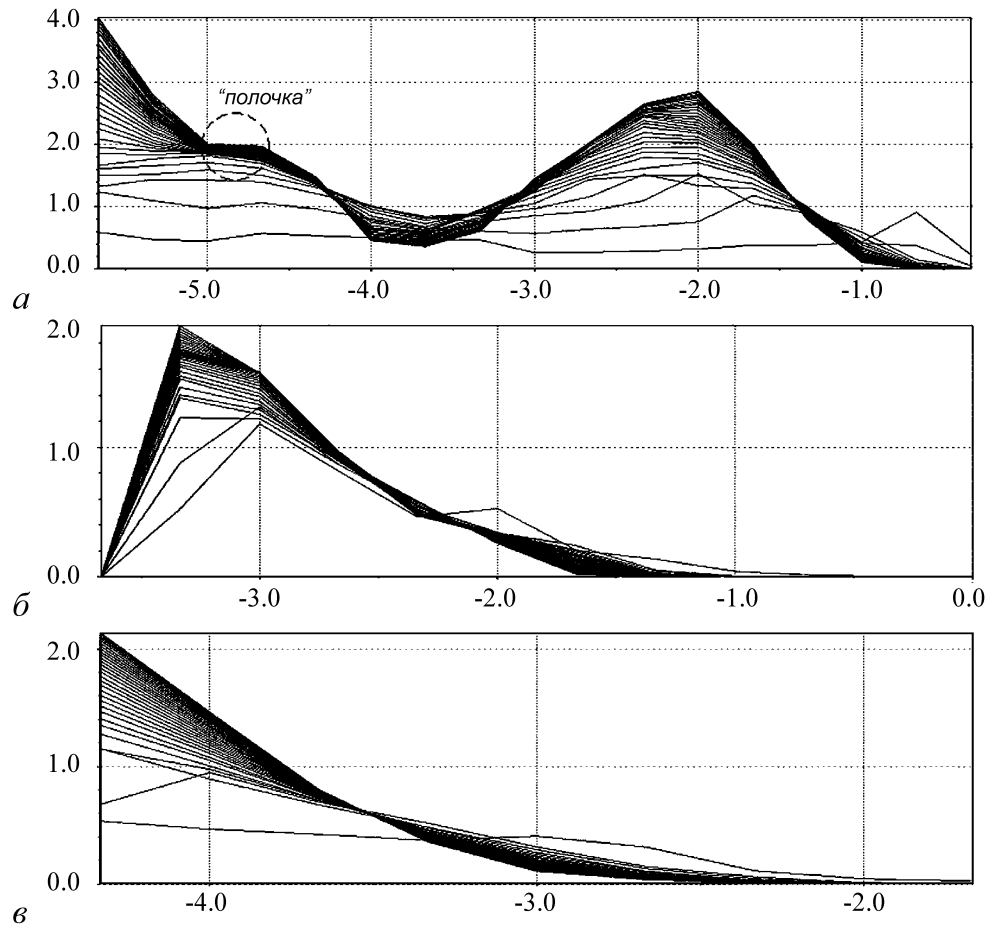


Рис. 4. Корреляционные размерности в системе координат $(\log_2 \varepsilon; D_c)$ временных рядов суточных колебаний режимных параметров объекта: *a* – уровня эпората в стакане конденсатора; *б* – расхода охлаждающей воды в системе дефлегматор – конденсатор; *в* – давления в кубовой части колонны

(рис. 4, *a*), присутствующая вне зависимости от размерности фазового пространства. Напротив, колебания давления в кубовой части эпорационной колонны и расхода охлаждающей воды носят стохастический характер и обусловлены случайными воздействиями, а не нелинейными свойствами динамической системы, поскольку насыщения графиков корреляционной размерности у соответствующих рядов не наблюдается. Следовательно, выдвинутая первоначально гипотеза подтвердилась, и колебания уровня эпората в стакане конденсатора обусловлены нелинейными динамическими свойствами системы дефлегматор – конденсатор, а не случайными стохастическими воздействиями.

Дополнительным индикатором наличия детерминированного хаоса в рассматриваемом технологическом процессе могут служить характерные особенности вейвлетного преобразования анализируемых временных рядов, характеризующих динамику эпорационной колонны. На рис. 5 представлены построенные на основе вейвлета Морле скейлограммы временных рядов, соответствующих динамике уровня эпората в стакане конденсатора, расхода охлаждающей воды в системе дефлегматор – конденсатор, давления в кубовой части колонны.

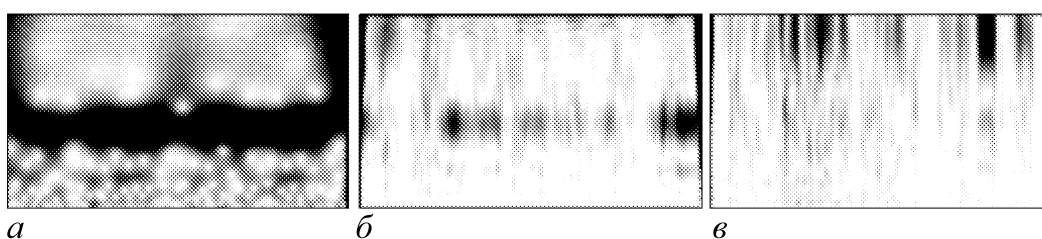


Рис. 5. Вейвлетные спектры суточных колебаний режимных параметров эпорационной колонны: *a* – уровня эпората; *б* – расхода охлаждающей воды в системе дефлегматор – конденсатор; *в* – давления в кубовой части эпорационной колонны

Анализ скейлограмм показывает, что характерная структура поверхности коэффициентов вейвлет-преобразования, соответствующая сценарию перехода к хаосу через перемежаемость ламинарной и турбулентной фаз движения [9], наблюдается только у колебаний уровня эпората (рис. 5, *a*), но отсутствует в скейлограммах расхода охлаждающей воды в системе дефлегматор – конденсатор (рис. 5, *б*) и давления в кубовой части эпорационной колонны (рис. 5, *в*), представляющих картину, характерную для стохастического случайного шума.

Поскольку наблюдаемый в системе управления расходом ЭАФ шум имеет детерминированную природу, то есть носит характер динамического хаоса, обладающего внутренним порядком в отличие от обычных стохастических шумов и помех, то возможно построение системы управления, учитывающей хаотический характер движения объекта управления [10].

3. Реконструкция нелинейного объекта управления

Задача реконструкции оператора эволюции динамической системы решалась в соответствии с методом, изложенным в [6], путем поиска трехмерного дискретного отображения. При этом авторы исходили из того, что, хотя реальный физический процесс, протекающий в системе дефлегматор – конденсатор эпорационной колонны является непрерывным, его математическое описание в классе нелинейных динамических систем целесообразнее искать в дискретном виде, поскольку в последующем данная модель в составе автоматической системы управления реализуется при помощи цифровой вычислительной техники, то есть так или иначе модель придется приводить к дискретной форме в виде конечно-разностных уравнений. И если возникнет необходимость дискретизации системы дифференциальных уравнений с последующей реализацией программного алгоритма, то в результате эффектов квантования непрерывная модель после аппроксимации производных дискретными аналогами и перехода от непрерывной модели к ее дискретному представлению может приобрести свойства, не свойственные исходной непрерывной модели, к примеру, потерять устойчивость.

Искомый эволюционный оператор представляется в виде разложения по базису полиномиальных функций [6], что является довольно громоздким описанием,

но при этом позволяет воспроизводить сигналы с высокой степенью точности и использовать для вычисления неизвестных коэффициентов эволюционного оператора методику параметрической идентификации методом наименьших квадратов (МНК).

Размерность пространства d , в котором размещается аттрактор реконструируемой динамической системы, находится как ближайшее целое корреляционной размерности: $d > D_c$, $D_c \approx 1.9$, $d = 2$. Размерность пространства вложения, необходимая для реконструкции аттрактора и определяемая по формуле Манэ $n \geq 2d + 1$, зачастую дает сильно завышенную оценку, поэтому, как правило, можно ограничиться пространством меньшей размерности $D_c < n < 2d + 1$. Поскольку физические процессы теплообмена в анализируемой динамической системе имеют непрерывную природу, полагаем $n = 3$, что соответствует условию возникновения детерминированного хаоса в системах не ниже третьего порядка и больше корреляционной размерности аттрактора.

Проведем реконструкцию временного ряда x_1, x_2, \dots, x_N в трехмерном фазовом пространстве (x, y, z) , где положение изображающей точки в момент времени $i = 1 \dots N-2$ определяется как $x = x_i, y = x_{i+1} - x_i, z = x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i$,

$$T_{j\ k+1} = \sum_{l_1, l_2, l_3=0}^{\nu} C_{l_1, l_2, l_3} \prod_{r=1}^n T_{rk}^{l_r}, \quad j = 1, \dots, n,$$

где $T_1 = x, T_2 = y, T_3 = z$; C_{l_1, l_2, l_3} – неизвестные коэффициенты, которые необходимо найти; ν – размерность полностью связанной системы; $n = 3$ – размерность пространства вложения (см. [6]).

Вопрос выбора порядка нелинейной полиномиальной системы ν решался авторами экспериментально, поскольку не может быть однозначно формализован и представляет собой компромисс между сложностью модели и точностью описания данной моделью наблюдаемого временного ряда.

Первоначально ограничимся вторым порядком нелинейной полиномиальной модели $\nu = 2$ и проведем реконструкцию временного ряда x_1, x_2, \dots, x_N в трехмерном фазовом пространстве при помощи нелинейной динамической модели вида

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{k+1} = a_{00} + a_{01}x_k + a_{02}y_k + a_{03}z_k + a_{04}x_k y_k + \\ \quad + a_{05}x_k z_k + a_{06}y_k z_k + a_{07}x_k^2 + a_{08}y_k^2 + a_{09}z_k^2, \\ y_{k+1} = a_{10} + a_{11}x_k + a_{12}y_k + a_{13}z_k + a_{14}x_k y_k + \\ \quad + a_{15}x_k z_k + a_{16}y_k z_k + a_{17}x_k^2 + a_{18}y_k^2 + a_{19}z_k^2, \\ z_{k+1} = a_{20} + a_{21}x_k + a_{22}y_k + a_{23}z_k + a_{24}x_k y_k + \\ \quad + a_{25}x_k z_k + a_{26}y_k z_k + a_{27}x_k^2 + a_{28}y_k^2 + a_{29}z_k^2, \end{array} \right. \quad (*)$$

где коэффициенты a_{ij} находятся путем решения задачи параметрической идентификации неизвестных коэффициентов методом наименьших квадратов с использованием выборки мощностью $N = 8638$ (полная мощность исходного временного ряда x_i , с учетом введенных разностей первого и второго порядка $x_{i+1} - x_i, x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i$).

Параметрическая идентификация приведенной нелинейной динамической модели, проведенная по временному ряду колебаний уровня эпората в стакане конденсатора, позволяет получить следующую матрицу коэффициентов, задающую конкретный вид динамической системы (*), динамика которой является реконструкцией исследуемого временного ряда:

$$\begin{bmatrix} a_{00} & \dots & a_{09} \\ a_{10} & \dots & a_{19} \\ a_{20} & \dots & a_{29} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 110.6531 & -0.2090 & -1.3984 & -1.2819 & -0.0018 & -0.0005 & -0.0002 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Как показали проведенные авторами вычисления, дальнейшее увеличение порядка полиномиальной модели не ведет к существенному увеличению точности представления, поскольку соответствующие коэффициенты a_{ij} при нелинейностях более высоких порядков оказываются весьма малыми и сравнимыми с погрешностью вычислений. Поэтому авторы сочли целесообразным остановиться на втором порядке нелинейной полиномиальной модели.

Результат реконструкции временного ряда, соответствующего колебаниям уровня эпората в стакане конденсатора, осуществленной при помощи рассмотренной нелинейной динамической системы (*), представлен на рис. 6. Анализ результатов показывает, что полученная модель хаотического движения динамической системы позволяет прогнозировать ее поведение с достаточной степенью точности с глубиной предсказания до 120 секунд (рис. 6, а). Несмотря на мощность выборки, глубина прогноза по сравнению с ней достаточно мала и составляет 0.15% от общего времени, на протяжении которого осуществляется наблюдение за объектом. Это обусловлено тем, что прогноз эволюции системы, динамика которой обладает свойствами детерминированного хаоса, на длительном промежутке времени невозможен. Кроме того, реконструированная динамическая система отражает в пределах глубины прогноза только количественные характеристики наблюдаемых хаотических колебаний и не соответствует его качественному характеру, что видно из отображения Пуанкаре временного ряда, реконструированного при помощи нелинейной динамической системы, моделирующей хаотическую динамику системы дефлегматор – конденсатор эпорационной колонны (рис. 6, б).

Полученная в результате идентификации с помощью МНК нелинейная динамическая система позволяет предсказать на определенное время поведение реального нелинейного объекта только потому, что она ведет себя на начальном этапе движения подобным образом: имеет приблизительно такие же степень перемешивания траекторий (корреляционную энтропию) и корреляционную размерность, заполняет примерно тот же объем фазового пространства; а отнюдь не потому, что полученная система нелинейных уравнений соответствует математическому описанию динамики физических процессов в реальном объекте управления (см. рис. 6, в, г). Поэтому

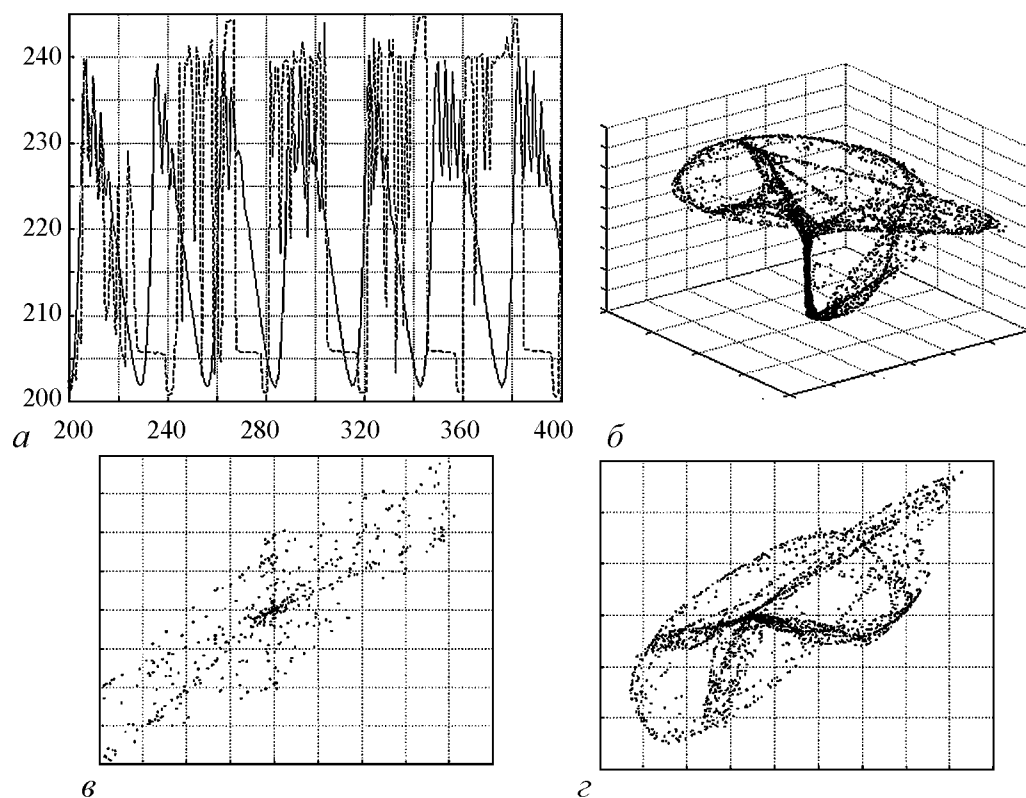


Рис. 6. Реконструкция нелинейных хаотических колебаний уровня эдюрата: *a* – фрагменты суточных графиков уровня эдюрата в стакане конденсатора (штриховая линия) и реконструкции колебаний уровня эдюрата (сплошная линия), мм; *б* – отображение Пуанкаре (x, y, z) реконструированной нелинейной модели; *в*, *г* – отображения Пуанкаре (z, y) реальной динамической системы (*в*) и ее реконструкции (*г*) на временном интервале, допускающем предсказание эволюции объекта управления

нельзя однозначно говорить о том, что нами получена и идентифицирована модель объекта управления – на самом деле нами получена модель, позволяющая прогнозировать поведение объекта управления на достаточно малом отрезке времени, и не более того.

4. Реализация системы автоматического управления (САУ) с учетом хаотической динамики объекта

Модификация разработанной ранее АСУП брагоректификации с учетом хаотической составляющей динамики эдюрационной колонны заключается в замене промышленного ПИД-регулятора ТСМ-21, реализующего ранее в контуре стабилизации расхода ЭАФ ПИД-регулирование без учета особенностей динамики объекта управления, на программируемый технологический контроллер ТКМ-51, средствами которого осуществляется прогнозирование хаотических колебаний и программная реализация адаптивного управления расходом ЭАФ (рис. 7).

Методы построения адаптивных САУ с использованием не непосредственно моделей объекта управления, а моделей, реконструирующих хаотическую динамику поведения объекта управления, то есть отражающих не структуру объекта управления, а количественные характеристики наблюдаемых хаотических колебаний, в настоящее время находятся в стадии разработки, являясь одним из направлений развития современной теории управления. Поэтому применительно к рассматриваемому случаю авторы, основываясь на своем опыте построения САУ с элементами прогнозирования/предсказания поведения регулируемой величины (см. [11, 12]), могут предложить один из методов построения системы управления, основанный на формировании управления не по измеренному значению регулируемой величины, что было реализовано на первоначальном этапе разработки и внедрения АСУП брагоректификации [1], а по его «предсказанному» значению (рис. 8).

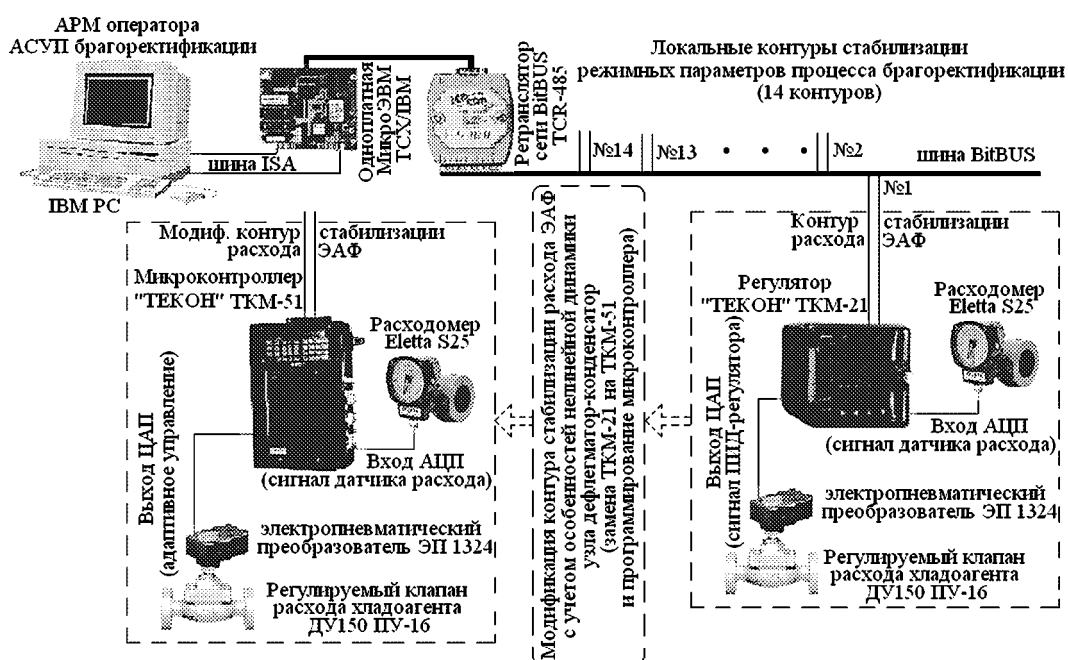


Рис. 7. Реализация подсистемы стабилизации расхода ЭАФ в составе АСУП брагоректификации с учетом нелинейной динамики эпорационной колонны



Рис. 8. Функциональная схема системы автоматического управления расходом ЭАФ в АСУП брагоректификации с прогнозом нелинейных колебаний в системе дефлегматор – конденсатор

Заключение

Таким образом, доказано, что колебания расхода ЭАФ, наблюдаемые в стационарном режиме функционирования эпорационной колонны и присутствующие в системе несмотря на работу соответствующего контура автоматического управления, обусловлены нелинейным характером динамики системы конденсатор – дефлегматор и имеют хаотический, а не стохастический характер, то есть вызваны детерминированными, а не случайными причинами. А поскольку хаос в нелинейной динамической системе имеет детерминированное происхождение, то этим процессом, в отличие от стохастического, в принципе, возможно управлять. В частности, наблюдаемый временной ряд, соответствующий хаотическим колебаниям уровня эпората, может быть реконструирован при помощи нелинейной динамической системы. Это дает возможность прогнозировать поведение объекта на некотором отрезке времени, что, в свою очередь, позволяет модернизировать разработанную ранее АСУП брагоректификации ФУГП «Веселолопанский спиртозавод» и реализовать в составе подсистемы САУ расходом ЭАФ эпорационной колонны устройство управления, формирующее управляющее воздействие с учетом особенностей нелинейной динамики объекта управления, заключающихся в собственных хаотических колебаниях системы конденсатор – дефлегматор, и тем самым добиться удовлетворительного качества управления данным режимным параметром, чего в принципе нельзя сделать традиционными методами теории управления, поскольку они не учитывают появления в системе динамических режимов, соответствующих детерминированному хаосу.

Работа выполнена в рамках хозрасчетного договора № 4804 от 1.10.2004 «Исследования возможностей и разработка концепции создания комплексного автоматизированного предприятия на базе ФГУП Росспиртпром „Веселолопанский спиртовой завод“».

Библиографический список

1. Касьянов Ю. В. Автоматизация технологического процесса ректификации культуральной спиртосодержащей жидкости в производстве спирта: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Орел: ОГТУ, 2003.
2. Справочник по производству спирта. Сырье, технология и теххимконтроль / Под ред. В. Л. Яровенко и др. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 336 с.
3. Кафаров В. В., Глебов М. Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. М.: Высшая школа, 1991. 400 с.
4. Чуличков А. И. Математические модели нелинейной динамики. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 296 с.
5. Мун Ф. Хаотические колебания: вводный курс для научных работников и инженеров / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 312 с.
6. Анищенко В. С. Знакомство с нелинейной динамикой. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. 144 с.

7. *Малинецкий Г. Г., Пономов А. Б.* Современные проблемы нелинейной динамики. М.: Едиториал УРСС, 2002. 360 с.
8. *Nerenberg M. A., Essex C.* Correlation dimension and systematic geometric effects // *Phys. Rev.* 1986. A 42, 7605.
9. *Короновский А. А., Храмов А. Е.* Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 176 с.
10. *Хасанов М. Н.* Фрактальные характеристики динамики объектов управления // *Автоматика и телемеханика.* 1994. № 2. С. 59.
11. *Филатов А. Г., Луценко О. В.* Выбор «глубины прогнозирования» оценки толщины ленты стекла методом анализа робастной устойчивости системы управления машины ВВС // Сб. докл. международной научно-практической конференции «Передовые технологии в промышленности и строительстве на пороге XXI века». Белгород. 1998. Часть 3. С. 992.
12. Патент № 2141684 РФ / *Рубанов В. Г., Филатов А. Г., Луценко О. В.* Устройство для регулирования толщины листового материала // Бюл. № 32 от 20.11.99.

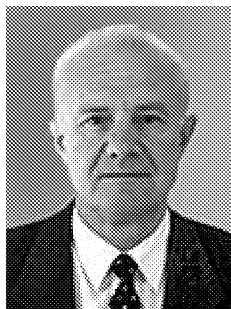
*Белгородский государственный
технологический университет*

*Поступила в редакцию 20.10.2006
После доработки 05.02.2007*

APPLICATION OF NONLINEAR DYNAMICS METHODS IN THE AUTOMATIZED CONTROL SYSTEM OF SPIRIT RECTIFICATION PROCESS

V.G. Rubanov, A.G. Filatov, J.V. Kasjanov, A.A. Rudnev

The analysis of regime parameters daily fluctuations of epuration columns is carried out, and it is proved, that observable noise-like fluctuations in the system dephlegmer – condenser have not stochastic, but the determined nature, and are caused by chaotic character of process dynamics. The system of the ether-aldehyde fractions expenditure stabilization is developed in the structure of automatic control system of ethyl spirit rectification. The revealed features of management object dynamics is took into account.



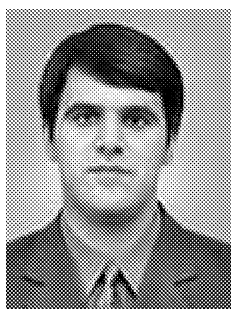
Рубанов Василий Григорьевич – окончил Харьковский авиационный институт им. Н.Е. Жуковского (1965). Заслуженный деятель науки Российской Федерации (2000), доктор технических наук (1992), профессор (1988), декан факультета автоматизации производств и информационных технологий Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова. Основатель и руководитель научно-инженерной школы, деятельность которой направлена на совершенствование методов проектирования микропроцессорных систем автоматизации технологического оборудования и процессов различных отраслей промышленности. Автор и соавтор более 200 печатных трудов, в том числе 3 учебников, 2 монографий, 30 изобретений и патентов. Награжден знаком «Изобретатель СССР».



Филатов Александр Геннадьевич – родился в Белгороде (1973), окончил Белгородскую государственную технологическую академию строительных материалов (1995) по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». Кандидат технических наук (1999), доцент кафедры технической кибернетики Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Автор и соавтор более 50 печатных трудов, в том числе 2 учебных пособий с грифом УМО, 3 изобретений и патентов. Область научных интересов: построение современных систем автоматического управления сложными техническими системами с использованием методов нелинейной динамики и «мягких» вычислений.



Касьянов Юрий Васильевич – родился в 1946 году, окончил Воронежский технологический институт (1975). Работал на ряде предприятий по производству спирта и прошел путь от рядового инженера до руководителя предприятия. На должность директора Веселолопанского спиртзавода был выдвинут в 1994 году. В 2003 году защитил кандидатскую диссертацию в Орловском государственном техническом университете по специальности 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами». Количество научных трудов 20.



Руднев Александр Александрович – родился в Белгороде (1979), окончил Белгородскую государственную технологическую академию строительных материалов (2001) по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». Старший преподаватель кафедры технической кибернетики Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Область научных интересов: обработка и визуализация данных в технических системах.