

УДК 681.5.015

DOI: 10.17223/19988605/49/8

М.А. Новосельцева, С.Г. Гутова, Е.С. Каган, Д.М. Бородулин**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОГО АППАРАТА**

Рассматривается задача структурно-параметрической идентификации модели, описывающей технологический процесс с применением роторно-пульсационного аппарата. Для построения модели технологического процесса используется аппарат теории непрерывных дробей. Показано, что экспериментальные данные процесса аппроксимируются разгонной характеристикой апериодического звена первого порядка с переменными коэффициентами.

Ключевые слова: структурно-параметрическая идентификация; непрерывная дробь; передаточная функция; технологический процесс; роторно-пульсационный аппарат.

Проблема идентификации моделей динамических объектов и технологических процессов является одной из актуальных в современной мировой науке и практике [1–16]. Математические модели используются практически во всех отраслях современной промышленности, и именно с их применением связаны успехи систем автоматизации действующих производств. Не является исключением и пивоваренная индустрия, которая за последние десятилетия осуществила прирост производственных мощностей. Начало XXI в. ознаменовано стремительным техническим развитием отечественной пивоваренной отрасли, направленным на увеличение объемов производства пива, расширение его ассортимента и повышение качества. В пивоварении технологический процесс охмеления пивного сусла играет важную роль. В процессе охмеления происходит ряд технологических явлений, таких как экстрагирование и изомеризация горьких веществ хмеля, придание хмелевой горечи, ароматизация пивного сусла и т.д. Применяемые в промышленности способы охмеления пивного сусла не дают достаточно полного и эффективного выхода экстрактивных веществ, специфических компонентов хмеля. Поэтому в последнее время в российской промышленности одним из наиболее перспективных способов интенсификации процесса охмеления пивного сусла является использование роторно-пульсационных аппаратов (РПА) [17–22], которые позволяют максимально извлекать горькие вещества из хмеля.

Для изучения закономерностей влияния технических и технологических характеристик РПА на процесс охмеления пивного сусла представляется актуальным проведение математического моделирования этого технологического процесса. Первые попытки моделирования процессов на выходе РПА были осуществлены на основе регрессионных моделей планирования эксперимента [23], однако для их построения необходим большой объем экспериментальных данных, что не всегда является практически реализуемым. Также имеется ряд исследований по определению влияния гидромеханических и акустических явлений в РПА на характеристики получаемого продукта [17–19]. В работах [20–22] проводится численное моделирование процессов растворения в данных аппаратах. Однако на сегодняшний день вопрос моделирования динамических процессов в РПА остается открытым.

В связи с этим представляется актуальным использование альтернативных методов моделирования данного технологического процесса. Одним из таковых является кибернетический подход к анализу РПА. В работе на основе алгоритмического аппарата непрерывных дробей будет рассмотрена структурно-параметрическая идентификация, позволяющая построить динамическую модель получения хмелевого экстракта в условиях отсутствия априорной информации и при минимальном объеме экспериментальных данных.

1. Постановка задачи структурно-параметрической идентификации динамического объекта

Априорная неопределенность и меняющиеся условия функционирования динамических объектов являются характерной чертой научных исследований, что значительно затрудняет применение большого количества существующих методов идентификации [1–17], в которых восстановление структуры модели является неочевидным процессом и приводит к перебору пробных моделей на основе субъективного экспертного подхода. Поэтому с целью принятия научно обоснованных технических решений становится актуальным использование методов структурно-параметрической идентификации.

Линейный динамический объект описывается непрерывной передаточной функцией (НПФ)

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (1)$$

где s – переменная преобразования Лапласа [3]. Известно также модальное представление НПФ объекта [3, 24]:

$$G(s) = K \prod_{i=1}^m (s - s_i^0) / \prod_{i=1}^n (s - s_i), \quad (2)$$

где $K = b_m/a_n$, $s_1^0, s_2^0, \dots, s_m^0$ – нули НПФ, s_1, s_2, \dots, s_n – полюсы НПФ.

Использование современных систем управления и новейших информационных технологий приводит к цифровым процессам получения и обработки информации, поэтому входное $x(t)$ и выходное $y(t)$ воздействия объекта могут быть представлены результатами измерений с некоторым временным шагом Δ : $x[0] = x(0\Delta)$, $x[1] = x(1\Delta)$, $x[2] = x(2\Delta)$, ... $y[0] = y(0\Delta)$, $y[1] = y(1\Delta)$, $y[2] = y(2\Delta)$... Тогда модель динамического объекта в цифровой форме с использованием преобразования $z = e^{s\Delta}$ [24] имеет вид:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_m z^{-m} + \dots + b_1 z^{-1} + b_0}{a_n z^{-n} + \dots + a_1 z^{-1} + 1}, \quad (3)$$

где $G(z)$ – дискретная передаточная функция (ДПФ) динамического объекта [24, 25], $X(z)$, $Y(z)$ – z -преобразования числовых последовательностей значений входного и выходного воздействий. Дискретную модель объекта можно представить и в форме конечно-разностного уравнения

$$y(n\Delta) = \sum_{i=0}^m b_i x[n-i] - \sum_{i=1}^n a_i y[n-i]. \quad (4)$$

Таким образом, задачей структурно-параметрической идентификации динамического объекта является построение моделей вида (1)–(4) по результатам измерений входного и выходного воздействий с шагом дискретизации Δ .

2. Структурно-параметрическая идентификация динамического объекта на основе теории непрерывных дробей

В последние десятилетия аппарат непрерывных дробей достаточно активно развивается в области фундаментальных исследований их свойств [26–28]. Однако вопросу использования непрерывных дробей в прикладных исследованиях отводится очень малая роль.

Ранее в авторских работах [24, 25, 29] теория непрерывных дробей была успешно использована для решения широкого спектра прикладных задач. Таковыми являлись задачи структурно-параметрической идентификации моделей различных динамических объектов, анализа свойств и характеристик детерминированных, периодических и стохастических процессов, оценки риска объектов и систем и т.д.

Для построения модели объекта поместим результаты измерений входного и выходного воздействий в строки № 0 и № 1 матрицы-идентификатора (5):

	столбец № 0	столбец № 1	столбец № 2	столбец № 3	...
строка № 0	$x[0]$	$x[1]$	$x[2]$	$x[3]$...
строка № 1	$y[0]$	$y[1]$	$y[2]$	$y[3]$...
строка № 2	a_{20}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	...
строка № 3	a_{30}	a_{31}	a_{32}	a_{33}	...
...

(5)

Остальные элементы матрицы-идентификатора находятся по формулам

$$a_{m,k} = a_{m-2,k+1}/a_{m-2,0} - a_{m-1,k+1}/a_{m-1,0},$$

$$a_{0,k} = x[k], a_{1,k} = y[k], k = 0, 1, 2, \dots$$

(6)

Расчет матрицы-идентификатора прекращается при появлении строки с нулевыми элементами. Данный факт является критерием останова вычислительной процедуры по формуле (6). Элементы столбца № 0 матрицы (5) образуют непрерывную правильную C -дробь [24, 25], аппроксимирующую ДПФ динамического объекта:

$$G(z) = \frac{a_{10}/a_{00}}{1 + \frac{a_{20}z^{-1}}{1 + \frac{a_{30}z^{-1}}{1 + \dots}}}$$

(7)

В случае $y[0] = 0$ строка № 1 матрицы сдвигается на один элемент влево. Отрицательная степень переменной z для данной строки увеличивается на единицу.

Затем непрерывную дробь (7) сворачивают в дробно-рациональное выражение, аналогичное (3), и определяют ее нули и полюсы. Для восстановления модели объекта в форме НПФ (2) требуется использовать соотношение

$$s = (\ln |z| + i \arg z) / \Delta.$$

(8)

При усложнении объекта у ДПФ могут появляться дополнительные нули и полюсы [24, 25], которые отсутствуют в НПФ. Это отрицательные или равные нулю корни числителя и знаменателя (7). Дополнительные нули и полюсы по формуле (8) в s -плоскость не переводятся [24, 25].

Далее находят коэффициент K согласно теореме о конечном значении [3] основных свойств z -преобразования:

$$\lim_{z \rightarrow 1} G(z) = K.$$

(9)

Пример. В качестве иллюстрации работы метода структурно-параметрической идентификации рассмотрим апериодический объект 1-го порядка. Его НПФ имеет вид [3]:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1},$$

(10)

где T – постоянная времени, K – коэффициент усиления. Реакция объекта на единичное ступенчатое воздействие описывается разгонной характеристики $h(t)$ вида:

$$h(t) = K(1 - e^{-t/T}).$$

(11)

Зададим некоторый шаг дискретизации Δ и заполним матрицу-идентификатор:

$$\begin{array}{cccc} 1 & 1 & 1 & \dots \\ K(1 - e^{-\Delta/T}) & K(1 - e^{-2\Delta/T}) & K(1 - e^{-3\Delta/T}) & \dots \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots \end{array}$$

(12)

Строка № 0 определяется значениями входного единичного ступенчатого воздействия. Элементы строки № 1 – значения разгонной характеристики (11), рассчитанные с шагом дискретизации Δ . Элементы строки № 1 сдвинуты на один столбец влево. Элементы строки № 2 рассчитаны по формуле (6):

$$a_{2k} = a_{0,k+1}/a_{00} - a_{1,k+1}/a_{10} = -e^{-\Delta/T} \cdot (1 - e^{-(k+1)\Delta/T}) / (1 - e^{-\Delta/T}),$$

причем

$$a_{20} = -e^{-\Delta/T}.$$

Элементы строки № 3 равны $a_{3k} = 0$. Появление строки с нулевыми значениями определяет ДПФ объекта:

$$G(z) = \frac{a_{01}/a_{00} \cdot z^{-1}}{1 + a_{20}z^{-1}} = \frac{K(1 - e^{-\Delta/T})z^{-1}}{1 - e^{-\Delta/T}z^{-1}}. \quad (13)$$

В ДПФ (13) нулей нет, полюс равен

$$z_1 = e^{-\Delta/T},$$

что при переходе в s -плоскость дает

$$s_1 = -1/T.$$

Последний результат совпадает с полюсом объекта (10). Тогда модель динамического объекта (10) имеет вид:

$$G(s) = k \frac{1}{s + 1/T} = \frac{kT}{Ts + 1}.$$

Для определения коэффициента передачи kT воспользуемся формулой (9) и получим

$$\lim_{z \rightarrow 1} G(z) = K.$$

Дискретная модель разгонной характеристики принимает вид:

$$h[n] = e^{-\Delta/T} \cdot h[n-1] + K(1 - e^{-\Delta/T}) \cdot x[n-1]. \quad (14)$$

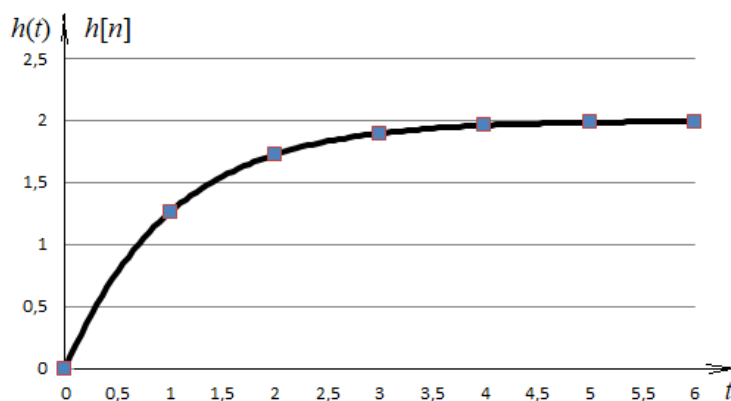


Рис. 1. Разгонная характеристика (11) и значения ее дискретной модели (14) (сплошная черная линия – график непрерывной разгонной характеристики, синие квадраты – значения дискретной модели)

Fig. 1. Overclocking characteristic (11) and values of its discrete model (14) (solid black line – graph of continuous acceleration characteristics, blue squares-values of discrete model)

На рис. 1 для сравнительного анализа приведены графики значений разгонной характеристики (11) и ее дискретной модели (14) для $\Delta = 1$, $K = 2$, $T = 1$. Очевидно, что дискретная модель точно оценивает значения истинной разгонной характеристики объекта и может быть использована для оценки состояния процесса на выходе объекта. Таким образом, на основе цифровых отсчетов входного и выходного воздействий апериодического звена 1-го порядка с использованием метода структурно-параметрической идентификации были определены структура и параметры модели объекта (10).

3. Структурно-параметрическая идентификация модели технологического процесса получения хмелевого экстракта

Разработка математической модели, описывающей технологический процесс получения хмелевого экстракта на выходе РПА, является актуальной задачей для пивоваренных отраслей промыш-

ленности, поскольку дает возможность определить необходимые технологические параметры работы (температура, частота вращения ротора), которые позволят максимально улучшить показатели по выходу экстракта. Осуществим структурно-параметрическую идентификацию этого процесса с использованием описанного выше метода.

Входным воздействием на РПА является количественное соотношение неохмеленного сусла и гранулированного хмеля F . Воздействие на выходе РПА – показатель эффективности процесса – содержание изогумулону в хмелевом экстракте (в мг/л). Техническими и технологическими параметрами, влияющими на процесс охмеления пивного сусла хмелевыми экстрактами, являются температура перерабатываемой среды t (°C), частота вращения ротора n (об/мин) и величина зазора между ротором и статором, измеряемая в миллиметрах. С помощью лабораторных исследований экспертами было установлено, что при величине зазора между ротором и статором, равной 0,3 мм, наблюдается лучший выход изогумулону в хмелевом экстракте. Поэтому при проведении дальнейших расчетов будет использоваться именно это значение зазора.

Зафиксируем значения параметров $t = 55^\circ\text{C}$, $n = 2\,500$ об/мин. Экспертами были предоставлены значения разгонной характеристики¹ по содержанию изогумулону, измеренные с шагом $\Delta = 1$ мин, в качестве входного воздействия было взято постоянное соотношение неохмеленного сусла и гранулированного хмеля, равное 8 мг/л.

Рассчитаем матрицу-идентификатор, в которой строка № 0 занята значениями входного воздействия, а строка № 1 – значениями разгонной характеристики:

8	8	8	8	8
18,82	20,06	22,33	22,38	22,40
-0,065887	-0,186504	-0,189161	-0,190223	...
-1,764758	-1,684464	-1,190223
1,876144	1,908832

В строке № 1 осуществлен сдвиг на один столбец влево, так как значение разгонной характеристики в начальный момент времени равно 0. Значения последующих строк рассчитаны по формуле (6). Строка матрицы № 5 может считаться равной нулю с точностью проведенных измерений.

Элементы столбца № 0 порождают непрерывную дробь вида:

$$G(z) = \frac{\frac{18,82}{8} z^{-1}}{1 - \frac{0,065887 z^{-1}}{1 - \frac{1,764758 z^{-1}}{1 + 1,876144 z^{-1}}}}.$$

Сворачивая полученную непрерывную дробь, получим дробно-рациональное выражение для ДПФ объекта

$$G(z) = \frac{2,3525 z^{-1} + 0,262035 z^{-2}}{1 + 0,045499 z^{-1} - 0,123614 z^{-2}}. \quad (15)$$

В s -плоскость переводится только один полюс – $z_1 = 0,329574$, получаем $s_1 = -1,109$. Тогда $T = 0,9009$, $K = 2,836078$. НПФ примет вид:

$$G(s) = \frac{2,8361}{0,9009s + 1}, \quad (16)$$

а конечно-разностное уравнение

$$h[n] = -0,045499 \cdot h[n-1] + 0,123614 \cdot h[n-2] + 2,3525 \cdot x[n-1] + 0,262035 \cdot x[n-2]. \quad (17)$$

¹ Данные собраны кандидатом технических наук, доцентом кафедры «Технологическое проектирование пищевых производств» Института инженерных технологий Кемеровского государственного университета Е.А. Сафоновой.

На рис. 2 приведена линейная аппроксимация исходных данных и полученной дискретной модели. Результаты идентификации при других значениях температур и частотах вращения ротора приведены в табл. 1, 2.

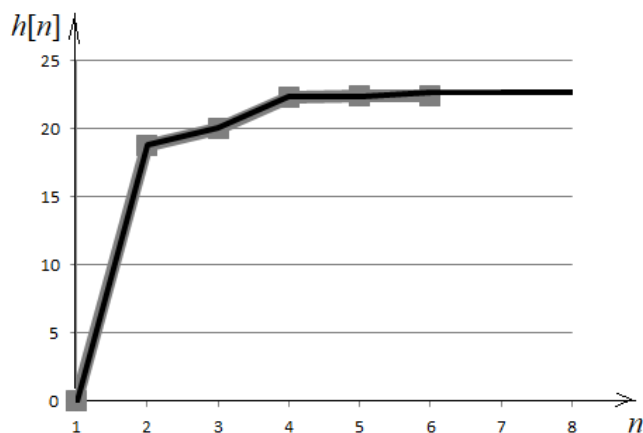


Рис. 2. Линейная аппроксимация экспериментальных данных и полученной дискретной модели разгонной характеристики (сплошная черная линия – значения конечно-разностного уравнения, серая линия с квадратами – линейная аппроксимация экспериментальных данных)

Fig. 2. Linear approximation of the experimental data and the resulting discrete model of the acceleration characteristic (solid black line – values of the finite difference equation, gray line with squares-linear approximation of the experimental data)

Таблица 1

Значения K при различных t и n

K		Частота вращения ротора n (1 000 об/мин)	
		$n_1 = 2,5$	$n_2 = 3$
Температура t , °C	$t_1 = 55$	2,836078	3,388565
	$t_2 = 70$	3,209291	3,879953
	$t_3 = 85$	3,605610	4,279379

Таблица 2

Значения T при различных t и n

T		Частота вращения ротора n (1000 об/мин)	
		$n_1 = 2,5$	$n_2 = 3$
Температура t , °C	$t_1 = 55$	0,9009	0,9950
	$t_2 = 70$	0,7348	0,8292
	$t_3 = 85$	0,7610	0,7407

Сравним результаты идентификации процесса охмеления с результатами идентификации апериодического звена 1-го порядка. Наличие дополнительных нуля и полюса ДПФ в модели процесса охмеления позволяет сделать предположение о том, что объект идентификации имеет более сложную структуру и не является линейным.

На основе полученных результатов зададим зависимости $K = K(t, n)$ и $T = T(t, n)$ и далее рассчитаем их значения с помощью метода наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} K &= -0,6886 + 0,0126t + 0,6986n + 0,0081tn - 0,0001t^2, \\ T &= 0,9340 - 0,0276t + 0,6461n - 0,0076tn + 0,0003t^2. \end{aligned} \quad (18)$$

Ошибки моделирования, найденные с помощью квадратического критерия, оказались равны:

$$\sum (K_{ij} - K(t_i, n_j))^2 = 0,001, \quad \sum (T_{ij} - T(t_i, n_j))^2 = 0,004.$$

Таким образом, для значений параметров t, n ($55 \leq t \leq 85$, $2,5 \leq n \leq 3$) модель процесса охмеления пивного сусла на выходе РПА описывается НПФ вида:

$$G(s) = \frac{K(t, n)}{T(t, n)s + 1},$$

а разгонная характеристика – следующей формулой:

$$h(t) = K(t, n) \cdot \left(1 - e^{-t/T(t, n)}\right), \quad (19)$$

где значения $K(t, n)$ и $T(t, n)$ находятся согласно (18).

Заключение

В работе показано, что экспериментальные данные, описывающие технологический процесс охмеления пивного сусла на выходе РПА, удовлетворительно аппроксимируются разгонной характеристикой аperiodического звена первого порядка, причем наибольшее совпадение наблюдается в установившемся режиме. НПФ такого звена имеет переменные коэффициенты, а зависимость коэффициентов от температуры и частоты вращения ротора имеет квадратичную природу. Полученные модели (17)–(19) позволяют осуществить выбор оптимальных технологических параметров обрабатываемой среды, которые улучшат показатели по выходу изогумуллона. Достоинство предложенного подхода заключается в том, что для моделирования не требуется наличия большого объема измерений. Использование данного подхода позволяет автоматически оценить неизвестную заранее структуру математической модели объекта, а также все его параметры, что существенно отличает его от существующих аналогов. Это преимущество освобождает исследователя от необходимости принимать эвристические решения, сопряженные с ошибками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ljung L., Glad T. Modeling & Identification of Dynamic Systems. Lund : Studentlitteratur AB, 2016. 402 p.
2. Isermann R., Munchhof M. Identification of Dynamic Systems. Berlin : Springer, 2011. 705 p.
3. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern control systems. Harlow : Pearson, 2011. 832 p.
4. Jafarov S.M., Mustafayeva A.M. Identification of dynamic objects under uncertainty and non-stationarity sing etalon transformers // Procedia Computer Science. 2017. V. 120. P. 561–567.
5. Utkin A.V. Synthesis of a Control System for a Steam Turbine // Automation and Remote Control. 2018. V. 79, is.12. P. 2186–2202.
6. Cerovsky Z., Lev M. Permanent Magnet Synchronous Machine Parameters Identification for Load Characteristics Calculation // Automatica. 2018. V. 56, No. 2, P. 241–246.
7. Weerts H.H.M., Van den Hof P.M.J., Dankers A.G. Identifiability of linear dynamic networks // Automatica. 2018. V. 89, No. 4. P. 247–258.
8. Gilberto P., Yang Wa, Boli Ch., Thomas P. Identification of multi-sinusoidal signals with direct frequency estimation: an adaptive observer approach // Automatica. 2019. V. 99, No. 1. P. 338–345.
9. Wang Ji, Le Vang T., Pyrkov A.A., Kolyubin S.A., Bobtsov A.A. Identification of Piecewise Linear Parameters of Regression Models of Non-Stationary Deterministic Systems // Automation and Remote Control. 2018. V. 79, No. 12. P. 2159–2168.
10. Voevoda A.A., Troshina G.V. Active identification of linear stationary dynamic objects on base of the Fisher information matrix: the steady state // 12th Int. Conf. on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk, Russia, 2–4 Oct. 2014. P. 745–748.
11. Shumikhin A.G., Aleksandrova A.S. Identification of a controlled object using frequency responses obtained from a dynamic neural network model of a control system // Computer Research and Modeling. 2017. V. 9, is. 5. P. 729–740.
12. Masaki I. Subspace identification with moment matching // Automatica. 2019. V. 99, No. 1. P. 22–32.
13. Первушин В.Ф. О непараметрической идентификации линейных динамических объектов // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. № 4 (25). С. 95–104.
14. Карабутов Н.Н. Структурная идентификация систем: анализ динамических структур. М. : МГИУ, 2008. 160 с.
15. Пупков К.А., Егупов Н.Д., Гаврилов К.И. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления : учебник / под ред. Н.Д. Егупова. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 743 с.
16. Tan A.H., Godfrey K.R. Industrial Process Identification. Perturbation Signal Design and Applications. Springer, 2019. 217 p.
17. Промтов М.А., Червяков В.М. Кинетика растворения NaCl в воде при обработке в роторно-импульсном аппарате // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2000. Т. 43, № 6. С. 120–123.
18. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. М. : Машиностроение, 2001. 247 с.
19. Червяков В.М., Однолько В.Г. Использование гидродинамических и кавитационных явлений в роторных аппаратах. М. : Машиностроение, 2008. 116 с.
20. Фёдоров А.В., Шульгин А.В., Василишин М.С., Иванов О.С., Иванова Д.В., Карпов А.Г. К оценке длительности процесса периодического растворения дисперсного материала в роторно-пульсационном аппарате // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84, № 4. С. 664–669.

21. Василишин М.С., Иванов О.С., Иванова Д.Б., Карпов А.Г., Кухленко А.А., Орлов С.Е. Кинетика массообмена при растворении дисперсных материалов в роторно-пульсационном аппарате // Химическая технология. 2013. Т. 14, № 2. С. 100–103.
22. Кухленко А.А., Орлов С.Е., Иванова Д.Б., Василишин М.С. Процесс растворения полидисперсных материалов в установке с вращающимся пульсационным аппаратом // Журнал инженерной физики и теплофизики. 2015. Т. 88, № 1. С. 23–34.
23. Иванец В.Н., Бакин И.А., Иванец Г.Е. Интенсификация процессов гомогенизации и диспергирования при получении сухих, увлажненных и жидких комбинированных продуктов // Техника и технология пищевых производств. 2012. № 3. С. 34–45.
24. Карташов В.Я., Новосельцева М.А. Динамическая оценка риска в сложных системах. Кемерово : Кемеровский гос. ун-т, 2012. 212 с.
25. Kartashov V.Ya., Novoseltseva M.A. Structural-and-Parametric Identification of Linear Stochastic Plants Using Continuous Fractions // Automation and Remote Control. 2010. V. 71, No. 8. P. 1727–1740.
26. Cuyt A.A.M., Petersen V., Verdonk B., Waadeland H., Jones W.B. Handbook of Continued Fractions for Special Functions. Springer, 2008. 431 p.
27. Waadeland H., Lorentzen L. Continued Fractions. Springer, 2008. 308 p.
28. Iosifescu M., Kraaikamp C. Metrical Theory of Continued Fractions. Springer, 2002. 383 p.
29. Novoseltseva M.A., Gutova S.G., Kazakevich I.A. Structural and parametric identification of a multisinusoidal signal model by using continued fractions // 2018 Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon 2018). 9–16 Sept. Sochi, Russia. 2018. P. 60–64.

Поступила в редакцию 18 марта 2019 г.

Novoseltseva M.A., Gutova S.G., Kagan E.S., Borodulin D.M. (2019) STRUCTURAL AND PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE PROCESS MODEL USING A ROTARY PULSATION MACHINE. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 49. pp. 63–72

DOI: 10.17223/19988605/49/8

The paper addresses the task of structural-parametric identification of a model describing the technological process of obtaining hop extract at the exit of using a rotary pulsation machine (RPM). In the literature, there have been attempts to simulate the process at the output of the RPM based on regression models of experiment planning, but their construction requires a large amount of experimental data, which is associated with repeated interruption of the technological process for taking measurements. This makes it impossible to use a passive experiment for data acquisition. Based on equally spaced measurements of the input and output effects, it is proposed to construct an identifier matrix. Basing on the values of its zero column, a continuous fraction is restored, which is converted into a discrete transfer function. Using the inverse formula for a consistent z -transform, the zeros and poles of the continuous transfer function (which is the final goal of the simulation) are determined. The transformation of the denominator polynomial of the continuous transfer function leads to the determination of the time constant T , the transfer coefficient K is determined by the finite value theorem. The constructed transfer function allows obtaining a model of any reaction of the object, including the RPM acceleration characteristics.

The empirical data allowed the authors to determine that the model of the desired RPM acceleration characteristics corresponds to the aperiodic link of the first order. However, in the discrete transfer function, obtained using the apparatus of continued fractions, there is an additional pole and zero. This indicates the presence of a nonlinear relationship between the input process, which is the quantitative ratio of unhopped wort and granulated hops, and the output process – the content of isohumulone in the hop extract. Additional technological parameters are the temperature t at which the hopping process occurs and the rotor speed n . Studies have shown that for different values of t and n , the parameters of the transfer function change.

The resulting models allow selecting the optimal technological parameters of the processed medium, which will improve the performance of isohumulone output.

Keywords: structural and parametric identification; continuous fraction; transfer function; technological process; rotary pulsation machine.

NOVOSELTSEVA Marina Aleksandrovna (Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Department of Applied Mathematics, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation).
E-mail: man300674@gmail.com

GUTOVA Svetlana Gennadyevna (Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Department of Applied Mathematics, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation).
E-mail: gsg1967@mail.ru

KAGAN Elena Sergeevna (Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Applied Mathematics, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation).

E-mail: kaganes@mail.ru

BORODULIN Dmitry Mihaylovich (Doctor of Technical Sciences, Director of the Institute of engineering technologies, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation).

E-mail: borodulin_dmitri@list.ru

REFERENCES

1. Ljung, L. & Glad, T. (2016) *Modeling & Identification of Dynamic Systems*. Sweden: Studentlitteratur AB.
2. Isermann, R. & Munchhof, M. (2011) *Identification of Dynamic Systems*. Germany: Springer.
3. Dorf, R.C. & Bishop, R.H. (2011) *Modern control systems*. Harlow: Pearson.
4. Jafarov, S.M. & Mustafaeva, A.M. (2017) Identification of dynamic objects under uncertainty and non-stationarity sing etalon transformers. *Procedia Computer Science*. 120. pp. 561–567.
5. Utkin, A.V. (2018) Synthesis of a Control System for a Steam Turbine. *Automation and Remote Control*. 79(12). pp. 2186–2202. DOI: 10.1134/S0005117918120081
6. Cerovsky, Z. & Lev, M. (2018) Permanent Magnet Synchronous Machine Parameters Identification for Load Characteristics Calculation. *Automatica*. 56(2). pp. 241–246. DOI: 10.7305/automatica.2015.07.813
7. Weerts, H.H.M., Van den Hof, P.M.J. & Dankers, A.G. (2018) Identifiability of linear dynamic networks. *Automatica*. 89(4). pp. 247–258. DOI: 10.1016/j.automatica.2017.12.013
8. Pin, G., Wang, Y., Chen, B. & Parisini, T. (2019) Identification of multi-sinusoidal signals with direct frequency estimation: An adaptive observer approach. *Automatica*. 99(1). pp. 338–345. DOI: 10.1016/j.automatica.2018.10.026
9. Wang, J., Le Vang, T., Pyrkin, A.A., Kolyubin, S.A. & Bobtsov, A.A. (2018) Identification of Piecewise Linear Parameters of Regression Models of Non-Stationary Deterministic Systems. *Automation and Remote Control*. 7(12). pp. 2159–2168. DOI: 10.1134/S0005117918120068
10. Voevoda, A.A. & Troshina, G.V. (2014). Active identification of linear stationary dynamic objects on base of the Fisher information matrix: the steady state. *12th Int. Conf. on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*. Novosibirsk, Russia, October 2–4, 2014. pp. 745–748.
11. Shumikhin, A.G. & Aleksandrova, A.S. (2017) Identification of a controlled object using frequency responses obtained from a dynamic neural network model of a control system. *Computer Research and Modeling*. 9(5). pp. 729–740. DOI: 10.20537/2076-7633-2017-9-5-729-740
12. Masaki, I. (2019) Subspace identification with moment matching. *Automatica*. 99(1). pp. 22–32. DOI: 10.1016/j.automatica.2018.10.002
13. Pervushin, V.F. (2013) On non-parametric models of linear dynamic objects. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 4(25). pp. 95–104.
14. Karabutov, N.N. (2008) *Strukturnaya identifikatsiya sistem: analiz dinamicheskikh struktur* [Structural Identification of Systems: Analysis of Dynamic Structures]. Moscow: Moscow State Industrial University.
15. Pupkov, K.A., Egupov, N.D. & Gavrilov, K.I. (2001) *Metody robustnogo, neyro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya* [Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control]. Moscow: Moscow State Technical University.
16. Tan, A.H. & Godfrey, K.R. (2019) *Industrial Process Identification. Perturbation Signal Design and Applications*. Springer.
17. Promtov, M.A. & Chervyakov, V.M. (2000) Kinetics of NaCl dissolution in water under the treatment in a rotary pulse apparatus. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya – Chemistry and Chemical Technology*. 43(6). pp. 120–123.
18. Promtov, M.A. (2001) *Pul'satsionnye apparaty rotornogo tipa: teoriya i praktika* [Rotary-Type Pulsation Apparatuses: Theory and Practice]. Moscow: Mashinostroenie.
19. Chervyakov, V.M. & Odnolko, V.G. (2008) *Ispol'zovanie gidrodinamicheskikh i kavitatsionnykh yavleniy v rotornykh apparatakh* [Use of Hydrodynamic and Cavitation Phenomena in Rotary Apparatuses]. Moscow: Mashinostroenie.
20. Fedorov, A.V., Shulgin, A.V., Vasilishin, M.S., Ivanova, D.B., Ivanov, O.S., & Karpov, A.G. (2011) On the evaluation of the time of periodical dissolution of a dispersed material in a rotor-pulse device. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 84(4). pp. 717–722.
21. Vasilishin, M.S., Ivanov, O.S., Ivanova, D.B., Karpov, A.G., Kukhlenko, A.A. & Orlov, S.E. (2013) Study of mass-exchange kinetics in rotary-pulsation plant. *Khimicheskaya tekhnologiya – Chemical Technology*. 14(2). pp. 100–103.
22. Kukhlenko, A.A., Orlov, S.E., Ivanova, D.B. & Vasilishin, M.S. (2015) Process of Dissolution of Polydisperse Materials in a Unit with a Rotary Pulsation Apparatus. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 88(1). pp. 23–34.
23. Ivanets, V.N., Bakin, I.A. & Ivanets, G.E. (2012) Intensifikatsiya protsessov gomogenizatsii i dispergirovaniya pri poluchenii sukhikh, uvlazhnennykh i zhidkikh kombinirovannykh produktov [Intensification of the processes of homogenization and dispersion in the preparation of dry, moist and liquid combination products]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv – Food Processing: Techniques and Technology*. 3. pp. 34–45.
24. Kartashov, V.Ya. & Novoseltseva, M.A. (2012) *Dinamicheskaya otsenka riska v slozhnykh sistemakh* [Dynamic risk assessment in complex systems]. Kemerovo: Kemerovo State University.

25. Kartashov, V.Ya. & Novoseltseva, M.A. (2010) Structural-and-Parametric Identification of Linear Stochastic Plants Using Continuous Fractions. *Automation and Remote Control*. 71(8). pp. 1727–1740. DOI: 10.1134/S0005117910080217
26. Cuyt, A.A.M., Petersen, V., Verdonk, B., Waadeland, H. & Jones, W.B. (2008) *Handbook of Continued Fractions for Special Functions*. Springer.
27. Waadeland, H. & Lorentzen, L. (2008) *Continued Fractions*. Springer.
28. Iosifescu, M. & Kraaikamp, C. (2002) *Metrical Theory of Continued Fractions*. Springer.
29. Novoseltseva, M.A., Gutova, S.G. & Kazakevich, I.A. (2018) Structural and parametric identification of a multisinusoidal signal model by using continued fractions. *2018 Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon 2018)*. Sochi, Russia, September 9–16, 2018. Sochi. pp. 60–64.