

УДК 681.5.015:669.295

Ю.П. Кирин, В.А. Тихонов

Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета, Березники, Россия

**КУСОЧНО-ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ
АВТОКОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМАХ ДВУХПОЗИЦИОННОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ
ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Изложен метод параметрической идентификации неопределенных динамических объектов, основанный на кусочно-экспоненциальной аппроксимации автоколебаний в системах двухпозиционного регулирования. Структура модели неопределенных динамических объектов, функционирующих в системах двухпозиционного регулирования, представлена дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами, в качестве которых рассматриваются динамические параметры и возмущение объектов. Общая схема параметрической идентификации предусматривает разбиение экспериментальных автоколебательных кривых на отдельные участки, описание автоколебаний на участках применением метода кусочно-экспоненциальной аппроксимации, последующее определение на основе полученных описаний неизвестных коэффициентов модели неопределенных динамических объектов. В качестве примера неопределенного динамического объекта рассмотрена зона нагрева промышленного аппарата вакуумной сепарации губчатого титана. Выделение информативных участков из экспериментальных кривых автоколебательных режимов основано на предположении о том, что в течение периода автоколебаний динамические параметры и возмущение неопределенного объекта остаются постоянными. При этом период автоколебаний предложено использовать в качестве интервала идентификации, на котором реальный неопределенный объект рассматривается квазистационарным, в процессе функционирования на разных интервалах идентификации – как семейство квазистационарных объектов управления. Такой подход позволяет описывать динамику неопределенного объекта на интервалах идентификации дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Получена система конечных уравнений, аппроксимирующая автоколебания на интервалах идентификации экспоненциальными функциями. В результате решения системы определены неизвестные коэффициенты дифференциального уравнения, и получена модель, адекватная реальному неопределенному объекту. Модель применена для разработки адаптивной и робастной систем управления технологическими процессами производства губчатого титана.

Ключевые слова: неопределенный динамический объект, модель, идентификация, автоколебания, кусочно-экспоненциальная аппроксимация.

Yu.P. Kirin, V.A. Tikhonov

Berezniki branch of the Perm National Research Polytechnic University,
Berezniki, Russian Federation

PIECEWISE-EXPONENTIAL APPROXIMATION OF SELF-OSCILLATIONS IN SYSTEMS OF TWO-POSITION REGULATION OF UNDEFINED DYNAMICAL OBJECTS

The method of parametric identification of indeterminate dynamic objects is described, based on the piecewise-exponential approximation of self-oscillations in systems of two-position control. The structure of the model of indeterminate dynamic objects functioning in systems of on-off regulation is represented by a differential equation with variable coefficients, which consider dynamic parameters and perturbation of objects. The general scheme of parametric identification provides for splitting the experimental self-oscillating curves into separate sections, the description of self-oscillations in the regions using the method of piecewise-exponential approximation, the subsequent determination based on the obtained descriptions of the unknown coefficients of the model of uncertain dynamic objects. As an example of an indefinite dynamic object, the heating zone of an industrial apparatus for vacuum separation of sponge titanium is considered. The selection of informative sections from the experimental curves of self-oscillating regimes is based on the assumption that during the period of self-oscillations the dynamic parameters and perturbation of an undetermined object remain constant. In this case, the period of self-oscillations is proposed to be used as an identification interval, on which the real undetermined object is considered quasi-stationary, in the process of functioning at different identification intervals, as a family of quasi-stationary control objects. This approach allows us to describe the dynamics of an undetermined object on the intervals of identification by differential equations with constant coefficients. A system of finite equations is obtained that approximates self-oscillations on the intervals of identification by exponential functions. As a result of the solution of the system unknown coefficients of the differential equation are determined, and a model is obtained that is adequate to the real undefined object. The model is used to develop adaptive and robust control systems for the production processes of sponge titanium.

Keywords: undefined dynamic object, model, identification, autooscillations, piecewise - exponential approximation.

Введение. Методы кусочной аппроксимации используются для исследования сложных объектов управления во многих прикладных задачах. Основная идея кусочной аппроксимации состоит в построении сокращенного описания экспериментальных кривых, характеризующих функционирование исследуемых объектов, путем разбиения кривых на отдельные участки и последующего построения на базе этих участков описания кривых в целом [1–3].

Метод кусочно-экспоненциальной аппроксимации может быть применен для параметрической идентификации моделей неопределенных динамических объектов в системах двухпозиционного регулирования. В качестве экспериментальных кривых, характеризующих функционирование таких объектов, используются рабочие режимы

двухпозиционного регулирования, которые представляют собой автоколебания сложной формы с переменными параметрами. Исследуя методом кусочно-экспоненциальной аппроксимации автоколебания на отдельных участках функционирования неопределенных динамических объектов, можно оценить их поведение и определить неизвестные коэффициенты математических моделей.

1. Структурная схема системы двухпозиционного регулирования неопределенного динамического объекта. Значительная часть промышленных объектов функционирует в замкнутых системах двухпозиционного регулирования в условиях неопределенности [4].

В представленной на рис. 1 структурной схеме неопределенный динамический объект (НДО) функционирует в режиме нормальной эксплуатации в замкнутом контуре многоканального двухпозиционного регулирования. На входе НДО действует неконтролируемое возмущение $z(t)$ [5].

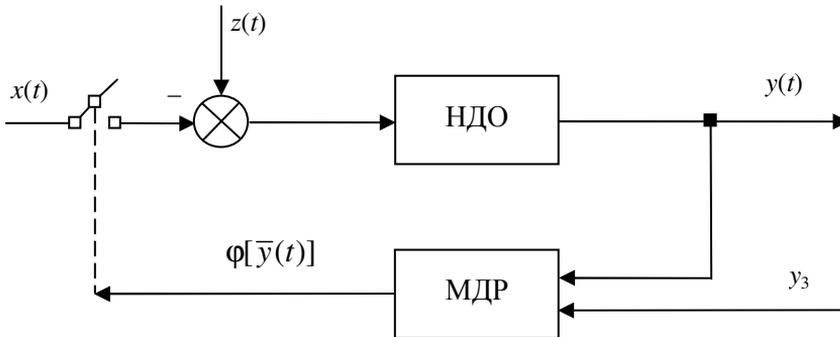


Рис. 1. Структурная схема многоканального двухпозиционного регулирования НДО

Включением и выключением входной величины $x(t)$ многоканальный двухпозиционный регулятор (МДР) поддерживает выходную величину $y(t)$ НДО на заданном уровне y_3 в соответствии с алгоритмом:

$$\varphi[\bar{y}(t)] = \left\{ \begin{array}{l} x(t) \text{ при } \bar{y}(t) < y_3 - \Delta y_0 \text{ и} \\ y_3 - \Delta y_0 \leq \bar{y}(t) \leq y_3 + \Delta y_0, y'(t) > 0; \\ 0 \text{ при } \bar{y}(t) > y_3 + \Delta y_0 \text{ и} \\ y_3 - \Delta y_0 \leq \bar{y}(t) \leq y_3 + \Delta y_0, y'(t) < 0; \end{array} \right.$$

$$\bar{y}(t) = y(\gamma T) \text{ при } \gamma T \leq t < (\gamma + 1)T, \gamma = 1, 2, \dots$$

где $\bar{y}(t)$ – квантованная по времени выходная величина НДО; $\varphi[\bar{y}(t)]$ – выходная величина МДР; $2\Delta y_0$ – зона нечувствительности МДР; $y'(t)$ – скорость изменения выходной величины; T – интервал квантования по времени.

При подключении МДР входной величины $x(t)$ на входе НДО действует разность $x(t) - z(t)$, при ее отключении поведение НДО определяется возмущающим воздействием $z(t)$. Система многоканального двухпозиционного регулирования при этом работает в режиме автоколебаний.

2. Структура модели НДО. Предполагается, что структура модели НДО задана дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами, описывающим динамику нестационарного объекта первого порядка с самовывравниванием [5]:

$$T_0(t) \cdot \frac{d[y(t)]}{dt} + y(t) = K_0(t) \cdot \{x[t - \tau(t)] - z(t)\}. \quad (1)$$

В структуру модели (1) введены элементы неопределенности – коэффициенты, характеризующие динамические параметры и возмущение НДО: $T_0(t)$, $K_0(t)$, $\tau(t)$, $z(t)$ – соответственно постоянная времени, коэффициент усиления, запаздывание, возмущение НДО. Неопределенность объекта обусловлена тем, что указанные коэффициенты являются некоторыми неизвестными функциями времени.

Определение числовых значений неизвестных коэффициентов дифференциального уравнения (1) является задачей параметрической идентификации модели НДО в системах двухпозиционного регулирования. Общая схема параметрической идентификации в этом случае сводится к следующим этапам: разбиение экспериментальных автоколебательных кривых на отдельные участки; описание автоколебаний на участках применением метода кусочно-экспоненциальной аппроксимации; последующее определение на основе полученных описаний неизвестных коэффициентов модели НДО.

3. Выделение информативных участков автоколебаний в системе двухпозиционного регулирования НДО. Особенность управления НДО состоит в том, что наличие случайным образом изменяющихся неконтролируемых возмущений, дрейф статических и динамических

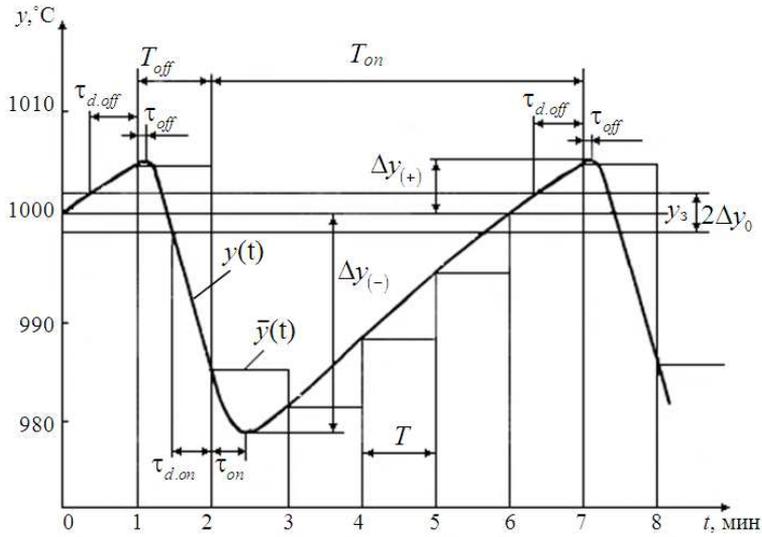
характеристик оборудования оказывают существенное влияние на рабочие режимы многоканального двухпозиционного регулирования, которые, как уже отмечалось во введении, представляют собой автоколебания сложной формы с переменными параметрами. При этом условия функционирования НДО естественным образом отражаются в динамике многоканального двухпозиционного регулирования. Исследуя экспериментально эволюцию автоколебаний на отдельных участках функционирования НДО, можно получить информацию, необходимую для параметрической идентификации математических моделей НДО.

Выделение информативных участков из экспериментальных кривых автоколебательных режимов основано на предположении о том, что в течение периода автоколебаний динамические параметры и возмущение НДО остаются постоянными. Иначе говоря, период автоколебаний предложено использовать в качестве интервала идентификации, на котором реальный НДО рассматривается квазистационарным, в процессе функционирования на разных интервалах идентификации – как семейство квазистационарных объектов управления. Следовательно, на интервалах идентификации НДО может быть представлен объектами первого порядка с самовыравниванием, структура модели которого задана обыкновенными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Это позволяет получить информацию о динамических параметрах и действующих возмущениях в реальных условиях функционирования НДО [5].

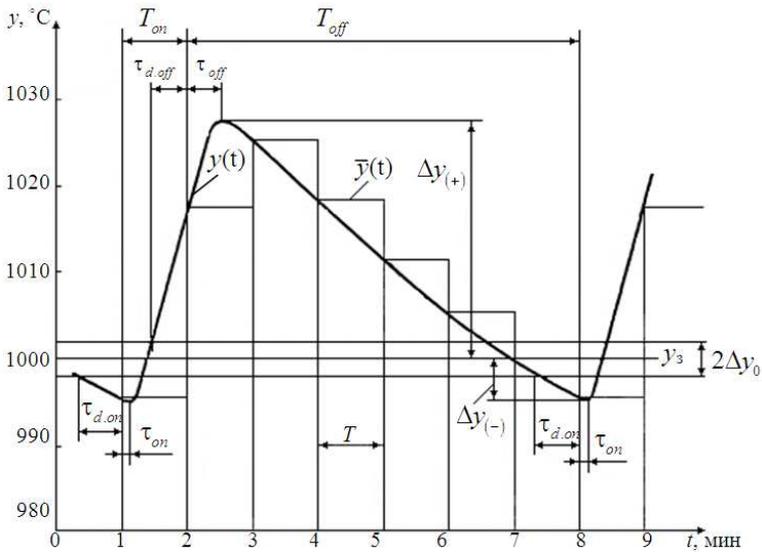
Таким образом, выделение информативных участков сводится к разбиению экспериментальных кривых автоколебательных режимов на ряд отдельных периодов автоколебаний – интервалов идентификации НДО.

В качестве примера определения информативных участков реального НДО рассмотрим эволюцию автоколебаний многоканального двухпозиционного регулирования температуры в зоне нагрева промышленного аппарата вакуумной сепарации губчатого титана на разных стадиях процесса (рис. 2).

В соответствии с принятыми на рис. 1 обозначениями здесь под $x(t)$ и $y(t)$ подразумевают соответственно мощность нагревателя и температуру зоны, под u_3 – заданное значение температуры зоны, под $z(t)$ – тепло, потребляемое зоной нагрева на испарение из титановой губки примесей магния и хлорида магния.



а



б

Рис. 2. Автоколебания температуры на интервалах идентификации зоны нагрева промышленного аппарата вакуумной сепарации губчатого титана в начале (а) и в конце (б) процесса сепарации: $\Delta y_{(+)}$, $\Delta y_{(-)}$ – соответственно амплитуды положительного и отрицательного отклонений температуры от y_3 ; T_{on} , T_{off} – время включения и выключения нагревателя зоны; τ_{on} , τ_{off} – время запаздывания зоны при включении и выключении нагревателя; $\tau_{d,on}$, $\tau_{d,off}$ – дополнительное время запаздывания МДР при включении и выключении нагревателя

Как видно из рис. 2, особенность многоканального двухпозиционного регулирования температуры вакуумной сепарации состоит в том, что в ходе процесса изменяются значения параметров автоколебаний температуры $\Delta y_{(+)}$, $\Delta y_{(-)}$, T_{on} , T_{off} , время запаздывания τ_{on} , τ_{off} зоны нагрева. МДР вносит в процесс регулирования температуры дополнительное переменное запаздывание $\tau_{d,on}$, $\tau_{d,off}$. Характер изменения этих параметров, а также возмущения $z(t)$ исследован на разных интервалах идентификации зоны нагрева в ходе процесса сепарации [5].

Изменение автоколебаний на разных интервалах идентификации можно интерпретировать как смену режимов функционирования реального НДО. Иными словами, на каждом из интервалов идентификации динамические параметры и возмущения НДО различны. В связи с этим автоколебания на интервалах идентификации являются наиболее информативными характеристиками для параметрической идентификации модели (1). Для получения информации о динамических параметрах и возмущениях необходимо располагать математическим описанием автоколебаний на интервалах идентификации НДО. Реальные автоколебания (см. рис. 2) не имеют аналитического выражения и, следовательно, не могут быть использованы для целей параметрической идентификации. Поэтому для описания автоколебаний целесообразно воспользоваться методом кусочно-экспоненциальной аппроксимации.

Выше отмечалось, что структура модели НДО на интервалах идентификации задана дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами. Это упрощает описание автоколебаний и позволяет использовать на интервалах идентификации НДО в качестве аппроксимирующих экспоненциальные функции [6].

4. Описание автоколебаний в системе двухпозиционного регулирования НДО. Реальные автоколебания (см. рис. 2) аппроксимируются экспоненциальными функциями и описываются на интервалах идентификации НДО системой конечных уравнений, устанавливающих взаимосвязь параметров автоколебаний и неизвестных коэффициентов модели (1):

$$\Delta y_{(+)} = K_0 \cdot (x - z) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_{off} + \tau_{d,off}}{T_0}\right) \right] + \Delta y_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{off} + \tau_{d,off}}{T_0}\right), \quad (2)$$

$$\Delta y_{(-)} = K_0 \cdot z \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_{on} + \tau_{d.on}}{T_0}\right) \right] + \Delta y_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{on} + \tau_{d.on}}{T_0}\right), \quad (3)$$

$$T_{on} = \tau_{on} + \tau_{d.off} + T_0 \cdot \ln \frac{K_0 \cdot x - (K_0 \cdot z - \Delta y_0) \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{on} + \tau_{d.on}}{T_0}\right)}{K_0 \cdot (x - z) - \Delta y_0}, \quad (4)$$

$$T_{off} = \tau_{off} + \tau_{d.on} + T_0 \cdot \ln \frac{K_0 \cdot x - [K_0 \cdot (x - z) - \Delta y_0] \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{off} + \tau_{d.off}}{T_0}\right)}{K_0 \cdot z - \Delta y_0}. \quad (5)$$

5. Параметрическая идентификация модели НДО. Предварительно методом пассивного эксперимента исследована динамика многоканального двухпозиционного регулирования температуры в рабочих режимах зоны нагрева аппарата вакуумной сепарации. Измерены значения $\Delta y_{(+)}$, $\Delta y_{(-)}$, T_{on} , T_{off} , τ_{on} , τ_{off} , $\tau_{d.on}$, $\tau_{d.off}$ системы уравнений (3)–(6) в начале и в конце процесса вакуумной сепарации (табл. 1).

Таблица 1

Параметры автоколебания температуры на интервалах идентификации НДО

Стадия процесса сепарации	Значения параметров автоколебаний							
	$\Delta y_{(+)}$, °С	$\Delta y_{(-)}$, °С	T_{on} , с	T_{off} , с	τ_{on} , с	τ_{off} , с	$\tau_{d.on}$, с	$\tau_{d.off}$, с
Начало процесса	5,7	20,5	300	60	26,4	7,2	28,8	36
Конец процесса	28,6	6,7	60	360	7,5	31,5	39	33

Поскольку в данном случае запаздывание объекта доступно для измерения, то задача параметрической идентификации модели НДО заключалась в определении из системы (2)–(5) числовых значений коэффициентов T_0 , K_0 , z дифференциального уравнения (1).

Задача формулируется следующим образом: по измеренным в эксперименте значениям $\Delta y_{(+)}$, $\Delta y_{(-)}$, T_{on} , T_{off} , τ_{on} , τ_{off} , $\tau_{d.on}$, $\tau_{d.off}$ (см. табл. 1) и известным x , $2\Delta y_0$ ($x = 130$ кВт, $2\Delta y_0 = 4$ °С) требуется определить из системы уравнений (2)–(5) неизвестные коэффициенты T_0 , K_0 , z дифференциального уравнения (1).

Следует заметить, что такая задача относится к классу обратных задач в отличие от известных в теории двухпозиционного регулирования прямых задач, когда по заданным динамическим параметрам и возмущению объекта требуется рассчитать параметры автоколебаний в системе двухпозиционного регулирования [7, 8].

Система (2)–(5) является переопределенной (на четыре уравнения (2)–(5) – три неизвестных). Неизвестные T_0 , K_0 , z найдены из условия минимума функции потерь [9], характеризующей различие измеренных в эксперименте параметров автоколебаний $\Delta y_{(+)}$, $\Delta y_{(-)}$, T_{on} , T_{off} и расчетных значений этих параметров из уравнений (2)–(5). Результаты идентификации приведены в табл. 2.

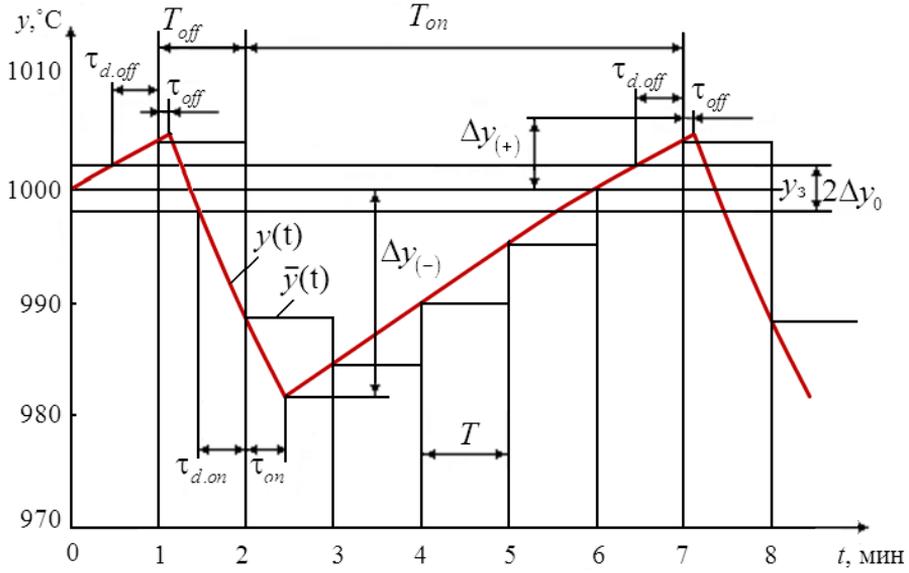
Таблица 2

Результаты идентификации модели НДО

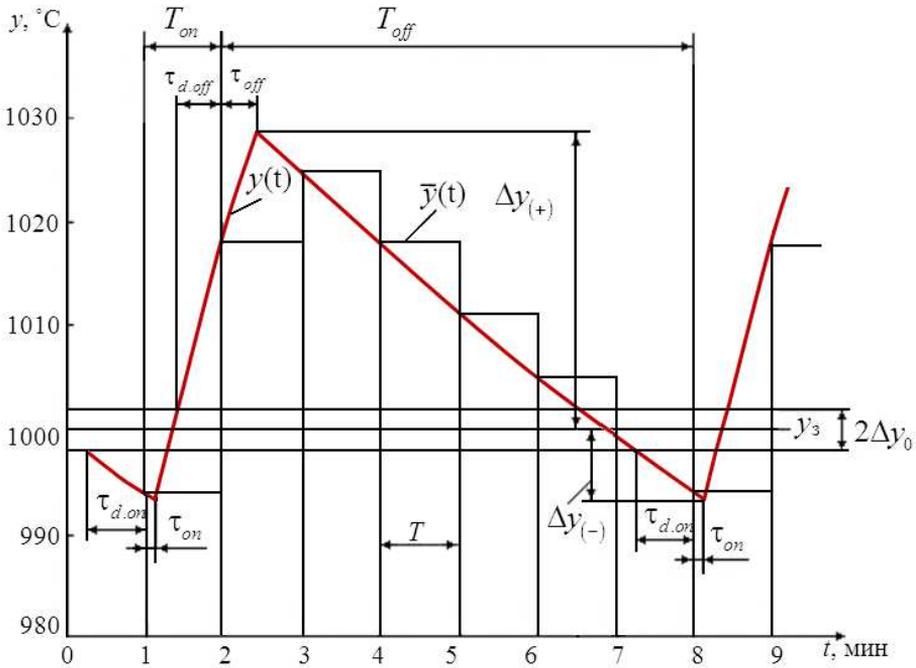
Стадия процесса сепарации	Расчетные значения параметров автоколебаний				Значения коэффициентов модели		
	$\Delta y_{(+)}$, °С	$\Delta y_{(-)}$, °С	T_{on} , с	T_{off} , с	T_0 , с	K_0 , °С/кВт	z , кВт
Начало процесса	5,9	19,5	299,3	60,5	772,0	2,7	105,3
Конец процесса	29,2	7,1	59,8	360,4	703,8	2,3	21,1

На рис. 3 по результатам идентификации построена кусочно-экспоненциальная аппроксимация автоколебаний в системе двухпозиционного регулирования температуры реального НДО.

6. Качество идентификации модели НДО. Мерой близости модели и реального НДО служит рассчитанная на интервалах идентификации относительная погрешность идентификации – разность измеренных в эксперименте (см. табл. 1) и расчетных значений амплитуд отклонений температуры (см. табл. 2), отнесенная к измеренному значению амплитуды. Эта величина не превышает 6 %. Следовательно, метод кусочно-экспоненциальной аппроксимации обеспечивает приемлемую для практики точность параметрической идентификации предложенной модели неопределенных динамических объектов.



a



b

Рис. 3. Кусочно-экспоненциальная аппроксимация автоколебаний в системе двухпозиционного регулирования температуры зоны нагрева промышленного аппарата вакуумной сепарации губчатого титана в начале (a) и в конце (б) процесса сепарации

Выводы. Рассмотрено применение метода кусочно-экспоненциальной аппроксимации автоколебаний для решения в системах двухпозиционного регулирования задачи параметрической идентификации модели неопределенных динамических объектов. Получена хорошая сходимость экспериментальных и расчетных данных, подтверждающая возможность практического использования модели.

Результаты параметрической идентификации модели применены для разработки адаптивной и робастной систем управления технологическими процессами производства губчатого титана [10, 11].

Предложенный метод кусочно-экспоненциальной аппроксимации автоколебаний может быть рекомендован для решения в системах двухпозиционного регулирования задач параметрической идентификации неопределенных динамических объектов различной физической природы.

Библиографический список

1. Дмитриев А.Г., Дорофеюк А.А. Методы кусочной аппроксимации многомерных кривых // Автоматика и телемеханика. – 1984. – Вып. 12. – С. 101–109.
2. Дорофеюк Ю.А. Структурная идентификация сложных объектов управления на базе методов кусочной аппроксимации // Управление большими системами. – 2010. – Вып. 30. – С. 79–88.
3. Касавин А.Д. Адаптивные алгоритмы кусочной аппроксимации в задаче идентификации // Автоматика и телемеханика. – 1972. – Вып. 12. – С. 98–104.
4. Порхало В.А., Бажанов А.Г., Магергут В.З. Информационные представления адаптивного трехпозиционного регулятора для его аппаратных и программных реализаций // Научные ведомости Белгород. гос. ун-та. – 2011. – Т. 17. – № 1–1. – С. 161–168.
5. Кирин Ю.П., Тихонов В.А. Определение структуры моделей неопределенных динамических объектов в системах двухпозиционного регулирования // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2017. – № 7. – С. 6–11.
6. Кирин Ю.П., Тихонов В.А. Параметрическая идентификация моделей неопределенных динамических объектов в системах двухпозиционного регулирования // Вестник Казан. технолог. ун-та. – 2017. – Т. 20. – № 5. – С. 91–94.

7. Кампе-Немм А.А. Автоматическое двухпозиционное регулирование. – М.: Наука, 1967. – 160 с.
8. Черепанов А.И. Динамика систем многоканального позиционного регулирования. – М.: Энергия, 1970. – 80 с.
9. Идентификация технологических процессов производства губчатого титана / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер, С.Л. Краев // Проблемы управления. – 2008. – № 4. – С. 71–77.
10. Кирин Ю.П., Затонский А.В., Беккер В.Ф. Построение адаптивной системы управления технологическими процессами в производстве губчатого титана // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 2. – С. 1–7.
11. Кирин Ю.П., Кирьянов В.В. Робастное управление технологическими процессами производства губчатого титана // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 2. – С. 120–123.

References

1. Dmitriev A.G., Dorofeiuk A.A. Metody kusochnoi approksimatsii mnogomernykh krivyykh [Methods of piecewise approximation of multidimensional curves]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1984, iss. 12, pp. 101-109.
2. Dorofeiuk Iu.A. Strukturnaia identifikatsiia slozhnykh ob"ektov upravleniia na baze metodov kusochnoi approksimatsii [Structural identification of complex control objects on the basis of methods of piecewise approximation]. *Upravlenie bol'shimi sistemami*, 2010, iss. 30, pp. 79-88.
3. Kasavin A.D. Adaptivnye algoritmy kusochnoi approksimatsii v zadache identifikatsii [Adaptive algorithms for piecewise approximation in the identification problem]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1972, iss. 12, pp. 98-104.
4. Porkhalo V.A., Bazhanov A.G., Magergut V.Z. Informatsionnye predstavleniia adaptivnogo trekhpozitsionnogo regulatora dlia ego apparatnykh i programmnykh realizatsii [Information representations of the adaptive three-position regulator for its hardware and software implementations]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, vol. 17, no. 1–1, pp. 161-168.
5. Kirin Iu.P., Tikhonov V.A. Opredelenie struktury modelei neopredelennykh dinamicheskikh ob"ektov v sistemakh dvukhpozitsionno-

go regulirovaniia [Determination of the Structure of Undefined Dynamic Objects in Two-Position Control Systems]. *Promyshlennye avtomatizirovannye sistemy upravleniia i kontroliery*, 2017, no. 7, pp. 6-11.

6. Kirin Iu.P., Tikhonov V.A. Parametricheskaia identifikatsiia modelei neopredelennykh dinamicheskikh ob"ektov v sistemakh dvukhpzitsionnogo regulirovaniia [Parametric identification of models of indeterminate dynamic objects in systems of on-off regulation]. *Vestnik kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 5, pp. 91-94.

7. Kampe-Nemm A.A. Avtomaticheskoe dvukhpzitsionnoe regulirovanie [Automatic two-position regulation]. Moscow: Nauka, 1967. 160 p.

8. Cherepanov A.I. Dinamika sistem mnogokanal'nogo pozitsionnogo regulirovaniia [Dynamics of multichannel positional regulation systems]. Moscow: Energiia, 1970. 80 p.

9. Kirin Iu.P., Zatonskii A.V., Bekker V.F., Kraev S.L. Identifikatsiia tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva gubchatogo titana [Identification of technological processes of production of sponge titanium]. *Problemy upravleniia*, 2008, no. 4, pp. 71-77.

10. Kirin Iu.P., Zatonskii A.V., Bekker V.F. Postroenie adaptivnoi sistemy upravleniia tekhnologicheskimi protsessami v proizvodstve gubchatogo titana [Construction of an adaptive control system for technological processes in the production of sponge titanium]. *Pribory i sistemy. Upravlenie kontrol' diagnostika*, 2009, no. 2, pp. 1-7.

11. Kirin Iu.P., Kir'ianov V.V. Robastnoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami proizvodstva gubchatogo titana [Robust control of technological processes of production of sponge titanium]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2016, no. 2, pp. 120-123.

Сведения об авторах

Кирин Юрий Петрович (Березники, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая технология и экология» Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета (618404, Березники, ул. Тельмана, 7, e-mail: vtihonov@bf.pstu.ru).

Тихонов Вячеслав Александрович (Березники, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая технология и экология» Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета (618404, Березники, ул. Тельмана, 7, e-mail: (klu2010@mail.ru).

About the authors

Kirin Yuri Petrovich (Berezniki, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology and Ecology of Berezniki Branch of Perm National Research Polytechnic University (618404, Perm region, Berezniki, 7, Telmana str., e-mail: vtihonov@bf.pstu.ru).

Tikhonov Vyacheslav Aleksandrovich (Berezniki, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology and Ecology of Berezniki Branch of Perm National Research Polytechnic University (618404, Perm region, Berezniki, 7, Telmana str., e-mail: (klu2010@mail.ru).

Получено 25.04.2018