



УДК 681.5.015

© 2014 г. А.А. Гончаров,
Г.Б. Диго,
Н.Б. Диго,

А.Ю. Торгашов, д-р техн. наук
(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ПЕРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКОЙ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫХОДА*

Рассматривается задача идентификации многомерного динамического объекта управления с переменной задержкой измерения выхода. При нахождении зависимости между входными переменными и выходом объекта используется оценка параметров импульсной характеристики.

Ключевые слова: импульсная характеристика, нерегулярное измерение выхода объекта управления, запаздывание.

Введение

При создании и эксплуатации систем управления проблема построения эффективных моделей объектов технических, технологических, экономических или социальных процессов [1] по-прежнему остается актуальной. В реальных условиях приходится преодолевать трудности, связанные с учетом неизвестного времени запаздывания входных сигналов и переменной задержкой измерения выхода, а также отсутствием сведений о структуре модели, что препятствует успешному применению регрессионного анализа [2 – 4]. В связи с этим приходится подбирать или разрабатывать методы, успешно их преодолевающие.

Для решения задач стабилизации многомерных динамических объектов с запаздыванием (ректификационные колонны установок первичной переработки нефти и др.), имеющих несколько десятков управляющих воздействий и управляемых переменных, широко применяются системы управления на основе прогнозирующих моделей. Очевидно, что на их эффективность влияет качество применяемых алгоритмов идентификации, одно из требований к которым состоит в обеспечении минимальной ошибки прогноза в условиях переменной задержки измерений выхода. При этом могут быть неизвестны структура и параметры мо-

* Работа выполнена при частичной поддержке гранта ДВО РАН № 12-I-П17-02 по программе фундаментальных исследований Президиума РАН №17 «Динамические системы и теория управления» и гранта ДВО РАН 12-III-A-03-221.

дели объекта, и в отличие от известных постановок задач идентификации приходится работать в условиях различных частот квантования входных и выходных переменных, что соответствует распространенной реальной ситуации, когда выход объекта измеряется нерегулярно, а значения других технологических переменных доступны на каждом такте управления.

В статье излагается подход к решению задач идентификации с учетом неопределенности структуры и параметров модели объекта в условиях переменной задержки измерений выхода для многомерных динамических объектов.

Постановка и анализ задачи

Рассматривается многомерный динамический объект с неопределенными структурой и параметрами модели объекта, с переменной задержкой измерений выхода. Ставится задача – разработать алгоритм идентификации, обеспечивающий учет динамических свойств объекта при нерегулярном измерении выхода.

Представим непрерывный линейный стационарный объект, описываемый с помощью импульсной переходной функции $h(\alpha)$:

$$y(t) = \int_0^n h(\alpha)u(t - \alpha)d(\alpha), \quad (1)$$

где u, y – входящее и выходящее воздействия системы; n – верхний предел интегрирования, называемый в дальнейшем глубиной модели.

Для дискретных систем уравнение (1) имеет вид:

$$y(t) = \sum_{k=0}^n h(k)u(t - k). \quad (2)$$

Предположим, что

$$h(k) = 0 \quad \text{при} \quad k < 0, \quad \sum_{k=0}^{\infty} |h(k)| < \infty, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} h(k) = 0. \quad (3)$$

При наличии шума уравнение (2) запишется в виде:

$$y(t) = \sum_{k=0}^n h(k)u(t - k) + v(t), \quad (4)$$

где $v(t)$ – некоррелируемая с выходом помеха с нулевым средним.

Уравнение для многомерного объекта с несколькими входами u_1, u_2, \dots, u_N и одним выходом, с учетом (1)-(4), примет вид:

$$y(\tau) = \sum_{k=0}^{n_1} h_1(k)u_1(\tau - k) + \dots + \sum_{k=0}^{n_N} h_N(k)u_N(\tau - k) + v(\tau), \quad (5)$$

где τ – нерегулярные моменты времени; $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_i = \tau_{i-1} + \tau_0 + \varepsilon$, τ_0 – постоянная составляющая; ε – случайная составляющая, ограниченная определенным диапазоном.

Без учета шума уравнение (5) запишем в виде:

$$y(\tau) = \sum_{k=0}^{n_1} h_1(k)u_1(\tau - k) + \sum_{k=0}^{n_2} h_2(k)u_2(\tau - k) + \dots + \sum_{k=0}^{n_N} h_N(k)u_N(\tau - k). \quad (6)$$

В качестве критериев идентификации на определенном временном промежутке используются:

коэффициент детерминации (доля объясненной дисперсии отклонений зависимой переменной от ее среднего значения)

$$R^2 = 1 - \sum_i (y_i - y_i^m)^2 / \sum_i (y_i - \bar{y})^2 ; \quad (7)$$

среднеквадратическая ошибка (СКО)

$$RMSE = \left(\sum_{i=1}^M (y_i - y_i^m)^2 / M \right)^{1/2}, \quad (8)$$

где y_i – наблюдаемое значение выходной переменной, а y_i^m – ее значение, полученное по модели объекта; \bar{y} – среднее значение наблюдаемой выходной переменной; M – количество измерений выхода. При этом модель тем больше соответствует исследуемому объекту, чем ближе к единице значение коэффициента детерминации R^2 либо чем ближе к нулю значение СКО.

Алгоритм решения поставленной задачи

Пусть $\mathbf{u} = [u_1(\tau), \dots, u_1(\tau - n_1), \dots, u_N(\tau), \dots, u_N(\tau - n_N)]^T$ – объединенный вектор входных воздействий размерности $\sum_{k=1}^N n_k$, где n_i – число значений i -го входа; $\mathbf{h} = [h_1(0), \dots, h_1(n_1), \dots, h_N(0), \dots, h_N(n_N)]^T$ – вектор импульсных характеристик той же размерности, компоненты которого отражают вклады соответствующих входных воздействий. Тогда уравнение (6) примет вид:

$$y = \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{h}. \quad (9)$$

Сформируем вектор \mathbf{Y} размерности $q = \sum_{k=1}^N n_k$ из измеренных в нерегулярные моменты времени значений выхода y , $\mathbf{Y} = [y(\tau_1), y(\tau_2), \dots, y(\tau_q)]^T$ и матрицу \mathbf{U} , содержащую измеренные входы u_i , соответствующие определенному значению выхода y из (6)

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_1(\tau_1) & \dots u_1(\tau_1 - n_1) & \dots u_N(\tau_1) & \dots u_N(\tau_1 - n_N) \\ u_1(\tau_2) & \dots u_1(\tau_2 - n_1) & \dots u_N(\tau_2) & \dots u_N(\tau_2 - n_N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_1(\tau_q) & \dots u_1(\tau_q - n_1) & \dots u_N(\tau_q) & \dots u_N(\tau_q - n_N) \end{bmatrix},$$

и запишем матричное уравнение

$$\mathbf{Y} = \mathbf{U}\mathbf{h}. \quad (10)$$

Введем функцию ошибки

$$\mathbf{E} = \bar{\mathbf{Y}} - \mathbf{Y} = \bar{\mathbf{Y}} - \mathbf{U}\mathbf{h},$$

где $\bar{\mathbf{Y}}$ – фактическое измерение выхода, минимизируем целевую функцию:

$$\Psi = \mathbf{E}^2 = (\bar{\mathbf{Y}} - \mathbf{U}\mathbf{h})^2.$$

Необходимым и достаточным условием нахождения минимума является равенство нулю первой производной $d\Psi / d\mathbf{h} = \mathbf{0} = \mathbf{U}^T (\bar{\mathbf{Y}} - \mathbf{U}\mathbf{h})$, откуда:

$$\mathbf{h} = (\mathbf{U}^T \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^T \bar{\mathbf{Y}}. \quad (11)$$

Полученные значения импульсных характеристик верны при отсутствии шумов, но в реальных условиях такая ситуация практически не встречается, поэтому использованы методы идентификации импульсных характеристик h_i урав-

нения (5), робастных по отношению к переменной задержке измерения выхода y , ошибкам измерений входов и выхода. Рассмотрены такие случаи как коррелированность входов, присутствие помехи на входах и выходе, отсутствие информации о глубине модели импульсных характеристик, невозможность учета некоторых из входных воздействий, использование измерений параметров, реально не влияющих на выход. При идентификации объектов, заданных передаточными функциями, применены такие методы как перебор всех доступных входных переменных, метод включения (добавление в модель по одной входной переменной), метод исключения (включение всех доступных для измерения входных переменных и последующее исключение по одному в порядке уменьшения их влияния на выход).

В первом случае результат будет наиболее точным, однако необходимо значительное время для вычислений. Метод включения требует меньших временных затрат, но качество модели может оказаться хуже, когда комбинация нескольких входов влияет на качество модели больше, чем каждый из них в отдельности. В то же время метод исключения эффективнее метода включения. Следует отметить, что для всех этих методов критичным является количество используемых в модели входов, так как ограниченность количества измерений выхода не позволит определить импульсные характеристики для каждого из них.

Тестирование алгоритма на различных объектах

При тестировании были выбраны наиболее часто встречающиеся варианты объектов промышленных технологических процессов.

1. Пусть объект задан формулой

$$y = 0.2951/(z - 0.9672) \cdot u_1 + 0.1728/(z - 0.9753) \cdot u_2, \quad (12)$$

но известны значения только входа u_1 , а u_2 является неизмеряемым внешним возмущением. Из уравнения (5) видно, что наличие шума в виде u_2 препятствует точному определению импульсных характеристик.

Реальные и полученные по модели значения выхода представлены на рис. 1, а показатели качества полученной модели – в табл. 1.

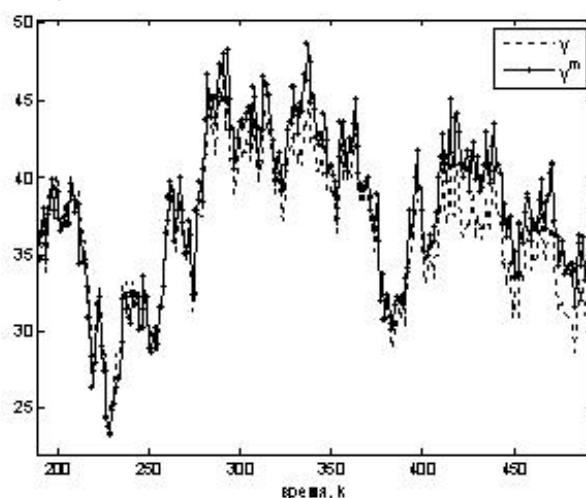


Рис. 1. Реальные и полученные по модели значения выхода для объекта с известными значениями входа u_1 .

Таблица 1

R ² обучающая	R ² проверочная	СКО обучающая	СКО проверочная
0.9434	0.9350	2.3802	2.6837

2. Рассматривается промышленный процесс фракционирования нефти в атмосферной ректификационной колонне и решается задача идентификации параметров модели для прогноза температуры конца кипения (T_{kk}) целевого продукта.

В качестве входов выбраны значения температур из различных зон колонны, профиль давления, расходы входных и выходных технологических потоков. Прогнозные значения T_{kk} сравниваются с данными поточного анализатора (ПА), доступными с задержкой в 40-50 мин. При такой величине запаздывания управление в контуре с обратной связью невозможно.

По имеющимся нецентрированным (ненормированным) промышленным данным и преобразованному путем добавления свободного члена h_0 уравнению (6) получен доступный на каждом такте управления выход $y(\tau)$:

$$y(\tau) = \sum_{k=0}^{n_1} h_1(k)u_1(\tau - k) + \dots + \sum_{k=0}^{n_N} h_N(k)u_N(\tau - k) + h_0. \quad (13)$$

Использование $y(\tau)$, полученного по (13), позволяет эффективно решать задачу автоматической стабилизации качества получаемого продукта технологического объекта. Результаты иллюстрируются табл. 2.

Таблица 2

Модели	R ² обучающая	R ² проверочная	СКО обучающая	СКО проверочная
С импульсной характеристикой	0,8485	0,592	0,5616	0,4209
Линейная регрессионная	0,5106	0.2043	1,1846	0,821

3. В тестовом объекте, заданном выражением (12), используются измерения входной переменной u_2 , которая реально не влияет на выходную переменную. Такие переменные выявляются на предварительном этапе и исключаются из рассмотрения или рассматриваются как внешнее воздействие. Пусть на вход u_1 поступает случайный нормально распределенный сигнал из диапазона $[-14;14]$ со средним значением 3, а на вход u_2 – равномерно распределенный сигнал из диапазона $[-1;5]$. В табл. 3 приведены показатели качества полученной модели.

Таблица 3

R ² обучающая	R ² проверочная	СКО обучающая	СКО проверочная
0.9846	0.9790	0.6477	0.8670

4. В тестовом объекте, заданном выражением (12), определяется глубина модели от каждого из входов к выходу. Для этого сначала выбирается наибольшая из возможных величин, которая постепенно уменьшается до тех пор, пока показатель качества полученной модели остается выше заранее определенной величины. Если выбранная глубина окажется более реальной, это не будет существ-

венно влиять на коэффициенты импульсной характеристики, но увеличит вычислительные затраты. Результаты выбора глубины модели для значений 100, 250, 350 объединены в табл. 4. Из нее следует, что глубина модели, равная 100, недостаточна для обеих импульсных характеристик, а 350 – избыточна. Поэтому ее значение было выбрано равным 250.

Таблица 4

Глубина модели	R^2 обучающая	R^2 проверочная	СКО обучающая	СКО проверочная
100	0.9982	0.9980	0.0354	0.0392
250	0.9999	0.9999	$6.8731 \cdot 10^{-6}$	$9.6645 \cdot 10^{-6}$
350	0.9999	0.9999	$4.0201 \cdot 10^{-8}$	$5.5109 \cdot 10^{-8}$

5. В тестовом объекте, заданном выражением (13), присутствуют ошибки измерений входов и выхода.

Количество неизвестных в формуле (13) равно $(q + 1)$, где $q = \sum_{k=1}^N n_k$, для их определения нужно $(q + 1)$ измерений выхода. На моделируемых данных показала свою эффективность оценка импульсной характеристики с помощью доступных измерений выхода, а не только измерений, необходимых для определения параметров импульсных характеристик. Однако влияние неизмеримых шумов на выход устранить полностью не представляется возможным, поэтому не удается получить точные импульсные характеристики.

Пусть помеха на выходе является равномерно распределенной случайной величиной из диапазона $[0;3]$, а глубина модели n для импульсных характеристик от обоих входов равна 250. В реальных условиях глубина модели заранее неизвестна, но при выборе ее больше истинного значения точность вычислений остается той же, однако временные затраты увеличиваются.

Результаты использования всех имеющихся измерений выхода (3479) и необходимого для определения векторов импульсных характеристик \mathbf{h} числа его измерений ($q + 1 = 501$) показаны на рис. 2, 3 и в табл. 5.

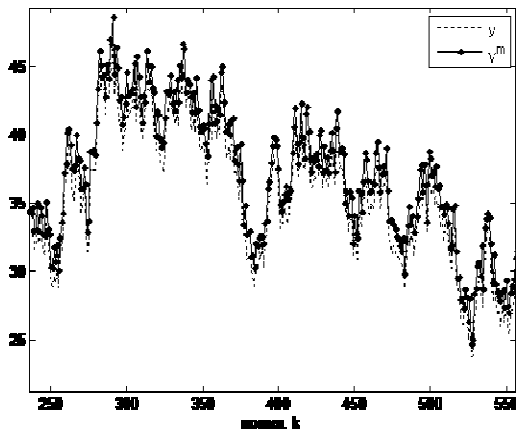


Рис. 2. Результат использования всех имеющихся измерений выхода.

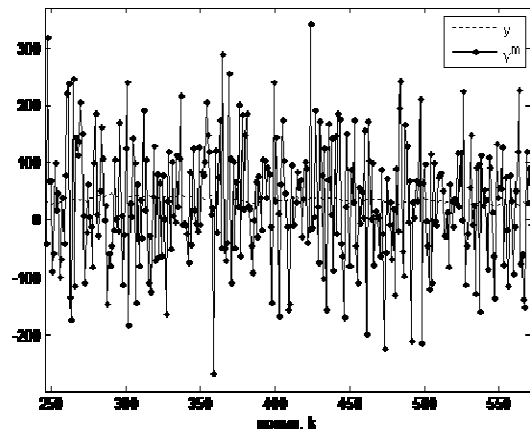


Рис. 3. Результат использования $(q + 1)$ измерений выхода.

Отрицательное значение R^2 , полученное по проверочной выборке с $(q + 1)$ измерениями выхода, свидетельствует о том, что обучающая выборка такой же

длины не охватывает в полной мере весь диапазон данных, а поэтому недостаточна для получения адекватной модели [5].

Таблица 5

Выборка	R ² обучающая	R ² проверочная	СКО обучающая	СКО проверочная
Все имеющиеся измерения выхода	0.9846	0.979	0.6477	0.867
(q+1) измерений выхода	1	-228.52	1.9035 10 ⁻¹⁸	9548.6

Сглаживание импульсных характеристик полученных моделей

При уточнении импульсных характеристик h_i , полученных по (11), применяется их сглаживание с помощью вейвлет-преобразования [6]. Для применения алгоритма сглаживания используются следующие выражения:

$$s(i) = \sum_{k=0}^i h(k), \quad h(i) = s(i) - s(i-1),$$

где s_i – элементы вектора переходной характеристики.

Каждый уровень разложения в вейвлет-преобразовании позволяет выделить составляющие ограниченного спектра частот, зависящие от используемого материнского вейвлета. Чем выше выбран уровень разложения, тем более низкие частотные составляющие могут быть выделены в сигнале. Сглаживание достигается удалением высокочастотных составляющих. Переходная характеристика, обеспечивающая наилучшее качество модели, находится для каждой из них перебором среди разложений различного уровня.

На рис. 4 показаны примеры несглаженных и сглаженных с помощью вейвлет-преобразования различных переходных характеристик.

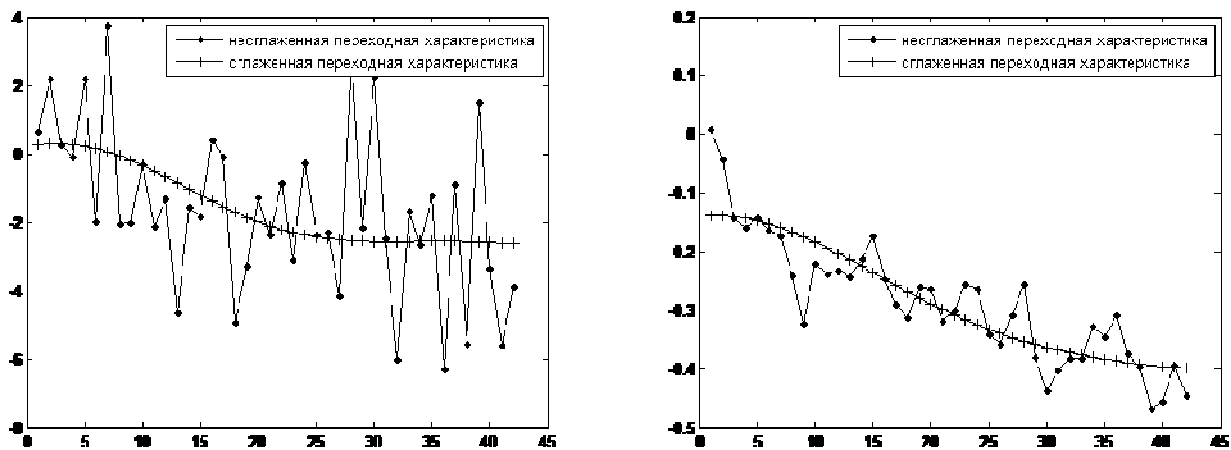


Рис. 4. Несглаженные и сглаженные переходные характеристики.

В табл. 6 приведены оценки качества моделей со сглаженными и несглаженными переходными характеристиками.

На рис. 5 показаны результаты промышленного эксперимента по изменению $T_{кк}$ целевого продукта в атмосферной ректификационной колонне фракционирования нефти: данные с ПА и полученные по моделям с несглаженными и сглаженными переходными характеристиками (ПХ).

Модели	R^2 проверочная	СКО проверочная
Модель без сглаживания	0,6113	0,8433
Сглаженная модель	0,7083	0,7307

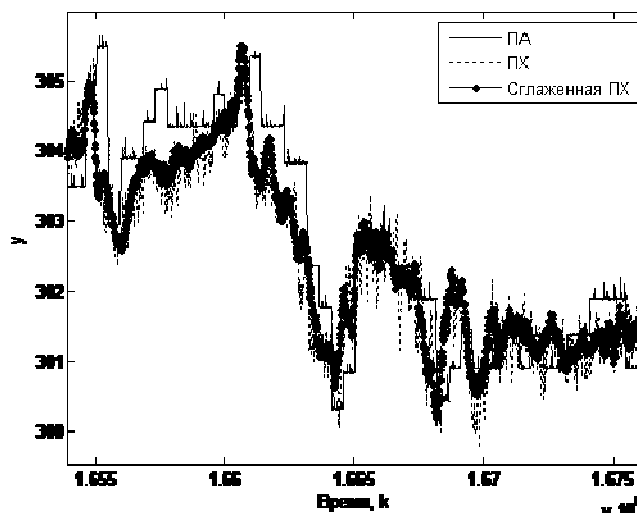


Рис. 5. Сглаженные и несглаженные переходные характеристики и данные с поточного анализатора.

Заключение

Предложенная процедура оценивания импульсной характеристики может быть легко реализована в реальных условиях. В используемом алгоритме идентификации нет необходимости обращаться к специальным тестовым сигналам, так как достаточно результатов пассивного эксперимента. Применение конечной импульсной характеристики для описания модели объекта позволяет преодолеть проблемы, связанные с неопределенностью структуры и параметров модели объекта в условиях нерегулярности измерений выхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дилигенская А.Н. Идентификация объектов управления. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2009.
2. Бокс Д., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. – М.: Мир, 1974. – Вып. 1.
3. Гроп Д. Методы идентификации систем. – М.: Мир, 1979.
4. Ли Р. Оптимальные оценки, определение характеристик и управление. – М.: Наука, 1966.
5. http://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_determination.
6. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171, № 5. – С. 465-501.

Статья представлена к публикации членом редколлегии О.В. Абрамовым.

E-mail:

Антон Александрович Гончаров – antalg@mail.ru;

Дуго Галина Борисовна – bernatsk@iacp.dvo.ru;

Дуго Наталья Борисовна – digo@iacp.dvo.ru;

Торгашев Андрей Юрьевич torgashov@iacp.dvo.ru.