

УДК 681.5.015

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОМЕРНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С НЕРЕГУЛЯРНЫМ ИЗМЕРЕНИЕМ ВЫХОДА

А.А. Гончаров

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
Россия, 690041, Владивосток, Радио ул., 5
E-mail: antalg@mail.ru*

Г.Б. Диго

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
Россия, 690041, Владивосток, Радио ул., 5
E-mail: bernatsk@iacp.dvo.ru*

Н.Б. Диго

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
Россия, 690041, Владивосток, Радио ул., 5
E-mail: digo@iacp.dvo.ru*

А.Ю. Торгашов

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
Россия, 690041, Владивосток, Радио ул., 5
E-mail: torgashov@iacp.dvo.ru*

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

Рассматривается задача идентификации объекта управления с несколькими входами и одним нерегулярно измеряемым выходом. Для поиска зависимости между входными и выходными переменными объекта управления используется оценивание импульсной характеристики в условиях наличия помех на выходе и коллинеарности входов.

1. Введение

На стадиях создания и эксплуатации систем управления по-прежнему актуальна проблема построения эффективных моделей объектов технических, технологических, экономических или социальных процессов [1]. В условиях неопределенности это связано с преодолением таких трудностей, как учет неизвестного времени запаздывания входных сигналов, нерегулярность измерения выхода, отсутствие сведений о структуре модели. Зачастую они препятствуют успешному применению регрессионного анализа [2-4], и приходится подбирать или разрабатывать методы, успешно преодолевающие возникающие трудности.

При решении задач стабилизации многомерных динамических объектов с запаздыванием (ректификационные колонны установок первичной переработки нефти и др.), в

которых число управляющих воздействий и управляемых переменных может достигать нескольких десятков, находят широкое применение системы управления на основе прогнозирующих моделей. Очевидно, что их эффективность напрямую зависит от качества применяемых алгоритмов идентификации, которые должны обеспечивать минимальную ошибку прогноза в условиях нерегулярных измерений выхода. В отличие от известных постановок задач идентификации приходится работать в условиях различных частот квантования входных и выходных переменных. Это соответствует распространенной реальной ситуации, когда выход объекта (например, показатель качества производимого продукта технологического процесса) измеряется нерегулярно, а значения других технологических переменных доступны на каждом такте управления. Кроме того, могут быть неизвестны структура и параметры модели объекта.

В докладе обсуждается подход к решению задач идентификации систем управления с учетом неопределенности структуры и параметров модели объекта, нерегулярности измерений выхода для многомерных динамических объектов с запаздыванием.

2. Постановка и анализ задачи

Рассматривается многомерный динамический объект с запаздыванием с неопределенными структурой и параметрами модели объекта, нерегулярным измерением выхода. Ставится задача разработки алгоритма идентификации, обеспечивающего учет динамических свойств объекта при нерегулярном измерении выхода.

Представим непрерывную линейную стационарную систему, описываемую с помощью импульсной переходной функции $h(\alpha)$, следующим образом:

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

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

Для дискретных систем уравнение (1) имеет вид:

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

Предположим, что

$$h(k) = 0 \quad \text{при} \quad k < 0,$$

$$(3) \quad \sum_{k=0}^{\infty} |h(k)| < \infty,$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} h(k) = 0.$$

При наличии шума уравнение (2) запишется в виде:

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

где $v(t)$ – некоррелируемая с выходом помеха с нулевым средним. В случае нескольких входов u_1, u_2, \dots, u_N и одном выходе уравнение (4) примет вид:

$$(5) \quad y(\tau) = \sum_{k=0}^{n_1} h_1(k) u_1(\tau - k) + \sum_{k=0}^{n_2} h_2(k) u_2(\tau - k) + \dots + \sum_{k=0}^{n_N} h_N(k) u_N(\tau - k) + v(\tau),$$

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:

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

В качестве критерия идентификации на определенном временном промежутке используются:

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

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

2) Среднеквадратическая ошибка (СКО)

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

где y_i – наблюдаемое значение выходной переменной, 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.

3. Решение поставленной задачи

3.1. Общий алгоритм решения

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

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

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

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

Введем функцию ошибки:

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

где $\bar{\mathbf{Y}}$ - фактическое измерение выхода, и 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 получаем:

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

3.2. Тестирование алгоритма идентификации для различных объектов

При тестировании изложенного алгоритма учитывались ситуации, встречающиеся на реальных объектах, такие 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. Для их преодоления при идентификации объектов применимы такие методы, как перебор всех доступных входных переменных, добавление в модель по одной входной переменной (метод включения), включение всех доступных для измерения входных переменных и последующее исключение по одному в порядке уменьшения их влияния на выход (метод исключения).

В первом случае результат должен быть наиболее точным, но 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, поэтому 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.

Рассматриваемые объекты заданы передаточными функциями.

1) Пусть тестовый объект задан выражением

$$(12) \quad y = \frac{0.2951}{z - 0.9672} u_1 + \frac{0.1728}{z - 0.9753} u_2,$$

а его входные переменные коррелированы между собой. Полученные для различных значений коэффициента корреляции между входами (КК) результаты приведены таблице 1.

Таблица 1. Полученные результаты для тестового объекта (12).

КК	R ² обучающая	R ² проверочная	СКО обучающая	СКО проверочная
1	0.9999	0.9999	2.3312·10 ⁻⁵	2.94982 10 ⁻⁵
0,8371	0.9999	0.9999	2.6884·10 ⁻⁵	3.889 10 ⁻⁵
0,0005	0.9999	0.9999	6.8731·10 ⁻⁶	9.6645·10 ⁻⁶

2) В тестовом объекте, заданном выражением (12), не все входные воздействия могут быть учтены, так как известны только значения входа u_1 . Из уравнения (6) очевидно, что получить точную импульсную характеристику не удастся. Такой случай иллюстрируется рис. 1 и 2, а полученные результаты приведены в таблице 2.

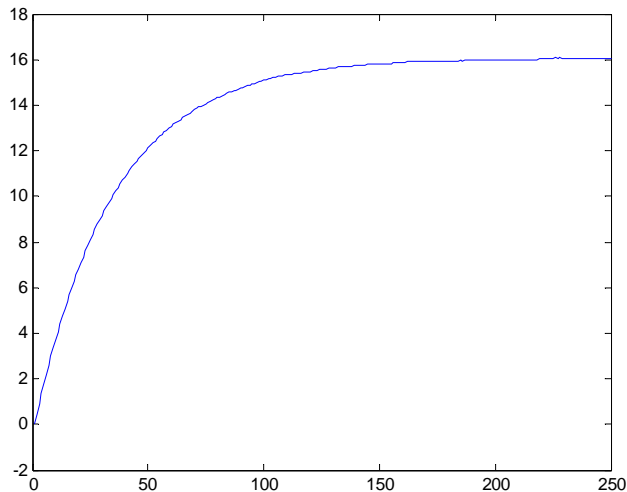


Рис. 1. Переходная характеристика объекта, полученная при известных измерениях только первого входа.

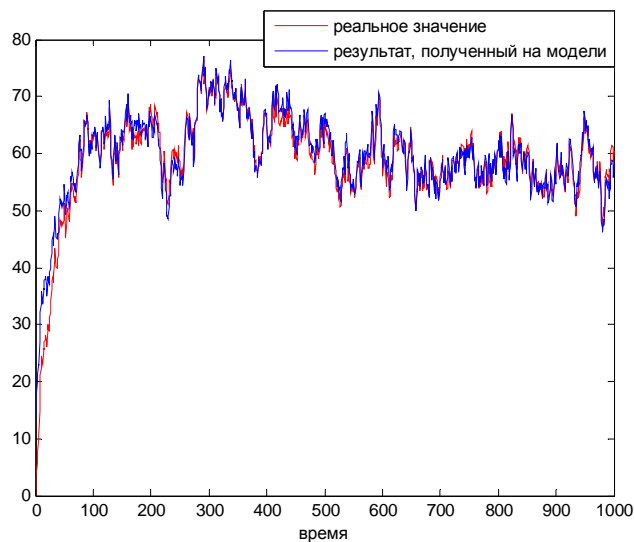


Рис. 2. Реальные значения выхода и значения выхода, полученные по модели.

Таблица 2. Результаты, полученные для тестового объекта (12) при неучтенном входном воздействии u_2 .

R^2 обучающая	R^2 проверочная	СКО обучающая	СКО проверочная
0.9599	0.9564	1.6583	1.8972

3) При определении набора импульсных характеристик \mathbf{h} для ненормированных входных воздействий, в уравнение (6) включается свободный член h_0

$$(13) \quad y(\tau) = \sum_{k=0}^{n_1} h_1(k)u_1(\tau - k) + \sum_{k=0}^{n_2} h_2(k)u_2(\tau - k) + \dots + \sum_{k=0}^{n_N} h_N(k)u_N(\tau - k) + h_0.$$

Эффективность применения уравнения (13) оценивалась по промышленным данным. Рассматривался промышленный процесс фракционирования нефти в атмосферной ректификационной колонне, и решалась задача идентификации параметров модели для

прогноза температуры конца кипения ($T_{\text{кк}}$) целевого продукта. В качестве входов использовались значения температур из различных зон колонны, профиль давления, расходы входных и выходных технологических потоков. Прогнозные значения $T_{\text{кк}}$ сопоставлялись с данными поточного анализатора, доступными с задержкой в 40-50 мин. С такой величиной запаздывания при управлении в контуре с обратной связью работать невозможно, а использование выхода $y(\tau)$ уравнения (13), доступного на каждом такте управления, позволяет эффективно решать задачу автоматической стабилизации качества получаемого продукта технологического объекта. Полученные результаты иллюстрируются рис. 3, 4 и таблицей 3. На рисунках y – измеряемое значение выходной переменной промышленного объекта, y^m – значение выхода, полученное по модели объекта.

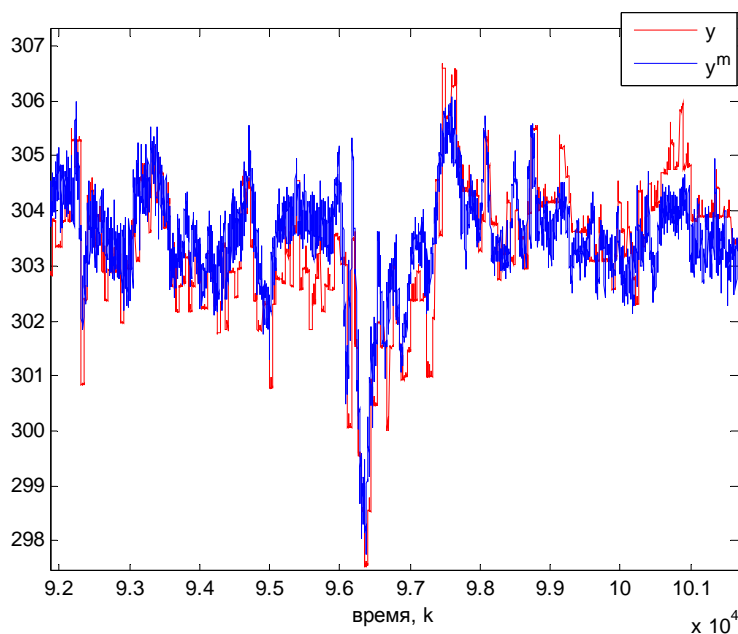


Рис. 3. Определение импульсной характеристики.

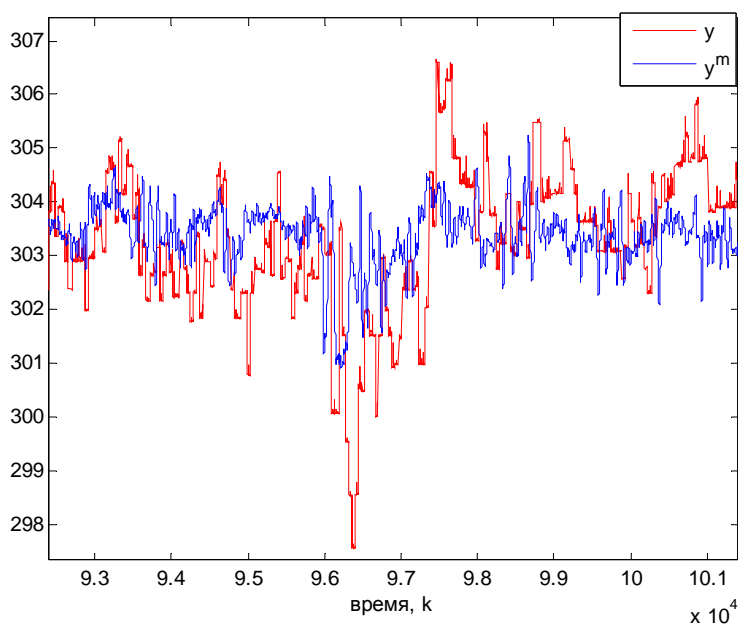


Рис. 4. Результаты, полученные по линейной регрессионной модели.

Таблица 3. Полученные результаты идентификации для объекта (13) по промышленным данным.

	R² обучающая	R² проверочная	СКО обучающая	СКО проверочная
Определение импульсной характеристики	0,8485	0,592	0,5616	0,4209
Линейная регрессионная модель	0,5106	0.2043	1,1846	0,821

4) В тестовом объекте, заданном выражением (12), используются измерения входной переменной u_2 , которая реально не влияет на выход системы. 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 таблице 4 приведены показатели качества полученной модели.

Таблица 4. Результаты, полученные для тестового объекта (12) при входном воздействии u_2 , не оказывающем влияния на выход.

R² обучающая	R² проверочная	СКО обучающая	СКО проверочная
0.9846	0.979	0.6477	0.867

5) 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 больше реальной, это не будет существенно влиять на коэффициенты импульсной характеристики, но увеличит вычислительные затраты. Результаты выбора глубины модели для значений 100, 250, 350 сведены в таблицу 5. Из нее следует, глубина модели, равная 100, недостаточна для обеих импульсных характеристик, а 350 – избыточна. Поэтому ее значение было выбрано равным 250.

Таблица 5. Результаты, полученные для тестового объекта (12) при различных глубинах модели.

Глубина модели	R² обучающая	R² проверочная	СКО обучающая	СКО проверочная
100	0.9982	0.998	0.0354	0.0392
250	0.9999	0.9999	$6.8731 \cdot 10^{-6}$	$9.6645 \cdot 10^{-6}$
350	0.9999	0.9999	$4.0201 \cdot 10^{-8}$	$5.5109 \cdot 10^{-8}$

4. Заключение

Предложенная процедура оценивания импульсной характеристики может использоваться в реальных условиях. В приведенном алгоритме идентификации нет необходимости обращаться к специальным тестовым сигналам, так как достаточно наличия

результатов пассивного эксперимента. Применение конечной импульсной характеристики при построении модели объекта позволяет преодолевать проблемы, связанные с неопределенностью ее структуры и параметров.

Рассмотрены примеры решения задач идентификации объектов с нерегулярным измерением выхода для случаев коллинеарных измеряемых входов, неучтенных (неизмеряемых) входных переменных и с различной глубиной (длиной импульсной характеристики) модели. Функционирование алгоритма опробовано на тестовых и промышленных данных.

Список литературы

1. Дилигенская А.Н. Идентификация объектов управления: Учебное пособие. Самара: Самарский государственный технический университет, 2009. 136 с.
2. Бокс Д., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 1974. Вып. 1. 406 с.
3. Гроп Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979. 302 с.
4. Ли Р. Оптимальные оценки, определение характеристик и управление. М.: Наука, 1966. 190с.