

А. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф., filimon_ab@mail.ru,
МИРЭА—Российский технологический университет, Москва,
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Н. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф., nbfilimonov@mail.ru,
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва

Структурно-параметрическая идентификация линейных динамических объектов

Рассматривается задача структурно-параметрической идентификации линейных стационарных динамических объектов в условиях проведения активных экспериментов. Исследуется вопрос об адекватности динамических моделей, построенных на основе анализа реакции объекта на типовое тестовое воздействие. Приведенные исследования позволяют сформулировать важные методологические положения, которые рекомендуется учитывать в новых разработках алгоритмов активной идентификации.

Показано, что в реальных условиях действия помех классическая методология построения передаточной функции объекта посредством анализа данных единичного эксперимента, т. е. отклика на тестовое воздействие, может давать неверные результаты. В связи с этим предлагается другой подход — формировать базу экспериментальных данных исходя из серии идентификационных экспериментов и на ее основе исследовать динамическую структуру свободных и вынужденных движений объекта. Идейную основу данного подхода составляют следующие решения: принцип "зондирования" пространства состояний объекта в целях определения его динамического порядка; использование механизма возбуждения свободных движений в объекте посредством финитных управляющих воздействий; применение интегрально-операторной формы представления динамики объекта, позволяющей избежать необходимости дифференцирования входного и выходного сигналов; использование аппарата линейной регрессии для параметрической идентификации передаточной функции объекта.

На основе данного подхода разработан и исследован новый метод структурно-параметрической идентификации линейных стационарных динамических объектов. Представленные результаты и компьютерная апробация в среде MATLAB показали работоспособность и эффективность данного метода идентификации.

Ключевые слова: линейные стационарные динамические объекты, передаточная функция, структурно-параметрическая идентификация, адекватность модели

Введение

Идентификация динамического объекта в общем случае заключается в определении его структуры и параметров по наблюдаемым данным — входным и выходным сигналам. Основные достижения в данной области исследований отражают публикации [1—15].

Различают активную и пассивную идентификации. *Активная* идентификация выполняется вне контура управления. В активных методах на вход объекта подаются тестовые сигналы детерминированного или случайного характера. *Пассивная* идентификация — идентификация в контуре управления посредством обработки входных и выходных сигналов в режиме нормального функционирования, т. е. без орга-

низации специальных воздействий на объект. Пассивную идентификацию используют для уточнения математической модели и для слежения за изменениями в объекте.

В статье рассматриваются вопросы активной идентификации. Основные идеи настоящей статьи изложены в ранней работе авторов [16]. Моделирование и анализ динамических объектов были проведены с использованием математического пакета MATLAB.

Класс идентифицируемых объектов

Рассматривается класс линейных стационарных динамических объектов управления со скалярными входом и выходом (SISO-система,

Single Input Single Output), описываемых в переменных состояния уравнениями вида

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u, \quad (1)$$

$$y = \mathbf{c}\mathbf{x}, \quad (2)$$

где $\mathbf{x} \in \mathbf{X} = \mathbf{R}^n$ — состояние, $\mathbf{X}$ — пространство состояний; $u \in \mathbf{R}$ — управляющий вход; $y \in \mathbf{R}$ — измеряемый выход; $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $\mathbf{b} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$, $\mathbf{c} \in \mathbf{R}^{1 \times n}$ — коэффициентные матрицы состояния, входа и выхода соответственно; $\mathbf{R}^i$ — i -мерное множество вещественных чисел.

Передаточная функция (ПФ) объекта равна

$$W(s) = \mathbf{c}(\mathbf{E}s - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{b} = \frac{N(s)}{D(s)}. \quad (3)$$

Здесь s — комплексная частота; $\mathbf{E} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ — единичная матрица; $D(s)$ и $N(s)$ — полиномы знаменателя (характеристический полином) и числителя ПФ объекта соответственно:

$$D(s) = s^n + \sum_{i=0}^{n-1} a_i s^i, \quad N(s) = \sum_{i=0}^{n-1} b_i s^i, \quad (4)$$

где a_i , b_i — постоянные коэффициенты, причем $b_0 \neq 0$.

Считаем объект вполне управляемым и наблюдаемым, так что дробь (3) — несократимая.

В реальных условиях функционирования на результаты экспериментов влияют неконтролируемые возмущающие воздействия и имеются инструментальные погрешности измерений. Действие данных факторов представим помехой в составе выхода объекта (2):

$$y = \mathbf{C}\mathbf{x} + \eta,$$

где $\eta \in \mathbf{R}$ — аддитивная помеха, которая далее полагается малой.

Классическая методология активной идентификации

Классическая схема активной идентификации SISO-объекта заключается в построении его ПФ $W(s)$ посредством анализа реакции объекта на некоторое тестовое воздействие. При этом чаще всего рассматривается переходная характеристика объекта $h(t)$ — его реакция на единичную ступенчатую функцию.

Таким образом, здесь предполагается проведение единичного опыта, т. е. число опытов $K = 1$.

Замечание. Согласно классической схеме идентификации для объекта с r -мерным входом требуется уже $K = r$ опытов (в которых, например, поочередно возбуждается каждый его скалярный вход).

Описанной схеме активной идентификации присущ принципиальный недостаток — неоднозначность результата, причем построенные в результате модели объекта могут существенно различаться динамическими свойствами (порядком, нулями и полюсами). Кстати, в работе авторов [17] показано, что широкий класс алгоритмов параметрической идентификации не обладает необходимым для практических применений свойством робастности в условиях зашумленности измерительной информации.

Для моделирования систем управления использовался пакет расширения Control System Toolbox системы MATLAB.

Пример 1. Приведем пример двух систем с различными ПФ:

$$W(s) = \frac{0,25s^2 + s + 1}{(s + 1)(1,25s + 1)(1,5s + 1)(1,75s + 1)}; \quad (5)$$

$$W'(s) = \frac{0,1s^2 + 1}{(0,42s + 1)(4,9s^2 + 4s + 1)}. \quad (6)$$

Соответствующие им переходные характеристики $h(t)$ и $h'(t)$ отличаются не более чем на 0,75 %:

$$\max_t |h(t) - h'(t)| \leq 0,0075.$$

На рис. 1 показан график функции $h(t)$.

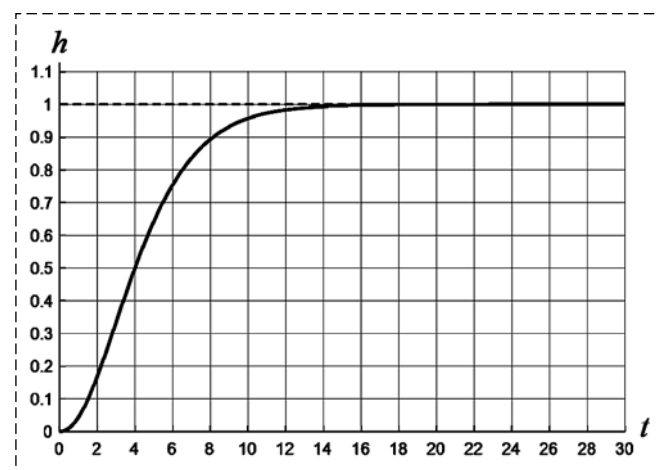


Рис. 1

Fig. 1

Приведем еще один пример двух систем с различными ПФ:

$$W_1(s) = \frac{1}{(s+1)(3s+1)};$$

$$W_2(s) = \frac{0,11s+1}{(1,25s+1)(2,75s+1)}.$$

Переходные характеристики данных систем различаются не более чем на 1 %:

$$\max_t |h_1(t) - h_2(t)| \leq 0,01.$$

Приведенные примеры показывают, что в реальных условиях действия на объект возмущений и помех экспериментально полученная переходная характеристика объекта не позволяет получить правильное решение задачи идентификации его ПФ.

Примечание. Пакет расширения System Identification Toolbox системы MATLAB содержит средства для построения математических моделей линейных динамических объектов на основе наблюдаемых входных/выходных данных. Укажем на две функции, предназначенные для идентификации ПФ объектов.

Функция

`data = iddata(y,u,Ts)`

создает `iddata`-объект, содержащий массивы значений `y` и `u` соответственно выходного и входного сигналов идентифицируемого объекта. Параметр `Ts` определяет шаг дискретизации времени для обрабатываемых экспериментальных данных.

Функция (`estimate transfer function`)

`sys = tfest(data,n)`

оценивает искомую ПФ (в нашем случае во временной области), используя данные `data`; `n` — заданное число полюсов ПФ.

Пример 2. Решим задачу идентификации с помощью функции `tfest()`. В качестве экспериментально полученного отклика возьмем переходную характеристику $h(t)$, отвечающую ПФ (5). Сформируем выборку отсчетов сигнала $h(t)$ на временном отрезке длительности $T = 40$ с тактом дискретности (шагом) $T_s = 0,001$. Результатом идентификации является ПФ (6), т. е. полученное решение ошибочно, и дальнейшее использование полученной модели неправомерно.

Таким образом, при решении задачи идентификации с применением функции `tfest()` необходимо знать динамический порядок объекта наблюдения.

Идейная основа предлагаемого метода идентификации

В настоящей работе предлагается новый метод идентификации линейных стационарных динамических объектов, основу которого составляют следующие решения:

- принцип "зондирования" пространства состояний объекта в целях определения его динамического порядка;
- механизм возбуждения свободных движений в объекте посредством финитных управляющих воздействий;
- интегрально-операторная форма представления динамики объекта, позволяющая избежать необходимости дифференцирования (в том числе многократного) входного и выходного сигналов;
- применение аппарата линейной регрессии для параметрической идентификации ПФ объекта.

Далее мы ограничимся рассмотрением идеализированного варианта задачи идентификации — пренебрежем влиянием помех на результаты экспериментов, формально полагая $\eta = 0$.

Организация идентификационных экспериментов

Идентификационный эксперимент является активным и складывается из двух серий опытов, связанных с возбуждением в объекте свободных движений посредством финитных управляющих воздействий и последующим их наблюдением.

Каждый опыт сопряжен с наблюдением свободных движений объекта на некотором конечном отрезке времени $[0, T]$.

В первой серии опытов осуществляется "зондирование" пространства состояний объекта X тестовыми воздействиями в целях анализа структуры его свободных движений и выявления динамического порядка объекта n . Число опытов здесь априори неизвестно, а само проведение опытов перемежается с теоретической обработкой накапливаемых эмпирических данных.

Во второй серии опытов проводится "прозванивание" канала "вход—выход" объекта в целях получения необходимого объема экспериментальных данных для последующей оценки параметров ПФ.

"Зондирование" пространства состояний объекта

Зондирование пространства состояний объекта заключается в возбуждении и анализе его свободных движений и реализуется следующим образом:

1) время опыта расширяется до $[-\tau, T]$, где $\tau > 0$, причем исходное состояние объекта — состояние покоя:

$$x(-\tau) = 0; \quad (7)$$

2) к объекту прикладываются финитные управляющие воздействия на промежутке времени $[-\tau, 0]$, отключаемые к моменту времени $t = 0$:

$$u(t) = 0 \text{ при } t \geq 0; \quad (8)$$

3) свободные движения объекта наблюдаются на отрезке времени $[0, T]$.

Обозначим $\Phi_{[-\tau, 0]}$ — класс кусочно-непрерывных финитных управляющих воздействий, удовлетворяющих условию (8).

Каждое управление $u(\cdot) \in \Phi_{[-\tau, 0]}$ переводит объект из нулевого состояния (7) в некоторое стартовое состояние $x(0) \in X$, которое, в свою очередь, порождает наблюдаемую на временном отрезке $[0, T]$ реакцию выхода $y(\cdot)$.

В конечном числе опытов можно апробировать конечное множество финитных входных воздействий

$$U = \{u_i(\cdot), i = \overline{1, K}\} \subset \Phi_{[-\tau, 0]} \quad (9)$$

и получить соответствующее семейство реакций

$$Y(U) = \{y_i(\cdot), i = \overline{1, K}\} \subset C[0, T],$$

где C — класс непрерывных функций.

Теорема 1. В силу полной управляемости и наблюдаемости объекта

$$\max_{U \subset \Phi_{[-\tau, 0]}} \text{rank } Y(U) = n, \quad (10)$$

где $\text{rank } Y(U)$ — ранг системы функций, равный размерности ее линейной оболочки.

Таким образом, прикладывая к объекту различные финитные воздействия и определяя ранг порождаемого ими семейства реакций, можно согласно соотношению (10) определить динамический порядок объекта.

Для того чтобы исключить влияние амплитуды тестовых сигналов на результаты анализа объекта, целесообразно вместо фактических реакций выхода $y_i(t)$ использовать нормированные реакции

$$y'_i = y_i / \|y_i\|,$$

где $\|y_i(t)\|$ — L_2 -норма функции $y_i(t)$.

Далее

$$Y'(U) = \{y'_i(\cdot), i = \overline{1, K}\}.$$

Для практического использования теоремы 1 необходимо располагать способом вычисления ранга системы функций. Для этого можно воспользоваться матрицей Грама:

$$\Gamma(Y') = [\langle y'_i, y'_j \rangle]_{i,j=\overline{1,K}},$$

где $\langle f, g \rangle$ — скалярное произведение функций $f, g \in C[0, T]$:

$$\langle f, g \rangle = \int_0^T f(t)g(t)dt.$$

Матрица Грама является неотрицательно определенной, а в случае линейной независимости системы функций — положительно определенной. Обращение определителя матрицы Грама в ноль — это критерий линейной зависимости системы функций. Ранг рассматриваемой системы функций определяется равенством

$$\text{rank } Y = \text{rank } \Gamma(Y').$$

Формирование финитных воздействий

Для генерирования множества финитных входных воздействий (9) можно обратиться к функциональному пространству $L_2[-\tau, 0]$, выбрать в нем подходящий базис и формировать из базисных функций тестовые сигналы в классе $\Phi_{[-\tau, 0]}$. В частности, можно использовать базис Уолша [18].

Функции Уолша принимают значения ± 1 и представляют собой полную систему ортонормированных прямоугольных функций. Важные свойства функций Уолша:

1. Ортогональность: скалярное произведение двух разных функций Уолша равно нулю.

2. Мультипликативность: произведение двух функций Уолша дает функцию Уолша.

Таблица 1
Table 1

K	1	2	3	4	5
$\text{rank } \Gamma(Y)$	1	2	3	4	4
$\det \Gamma(Y)$	1	0,971	0,114	$7,52 \cdot 10^{-7}$	$< 10^{-21}$

Предложенный метод зондирования пространства состояний проиллюстрируем на примере объекта с динамическим порядком $n = 4$ и ПФ (5). В проведенных компьютерных экспериментах применялись финитные воздействия $u_i(\cdot)$, $i = \overline{1, K}$, в виде функций Уолша длительности $\tau = 2$. На рис. 2 показаны входные сигналы $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$, $u_4(t)$, а на рис. 3 — соответствующие выходные сигналы $y'_1(t)$, $y'_2(t)$, $y'_3(t)$, $y'_4(t)$.

Результаты расчета ранга матрицы Грама и его определителя (с округлением) для различных значений K приведены в табл. 1.

Замечание. В реальных условиях действия помех задача зондирования пространства состояний существенно усложняется. Если помехи носят случайный характер, то необходимо привлекать методы статистического анализа.

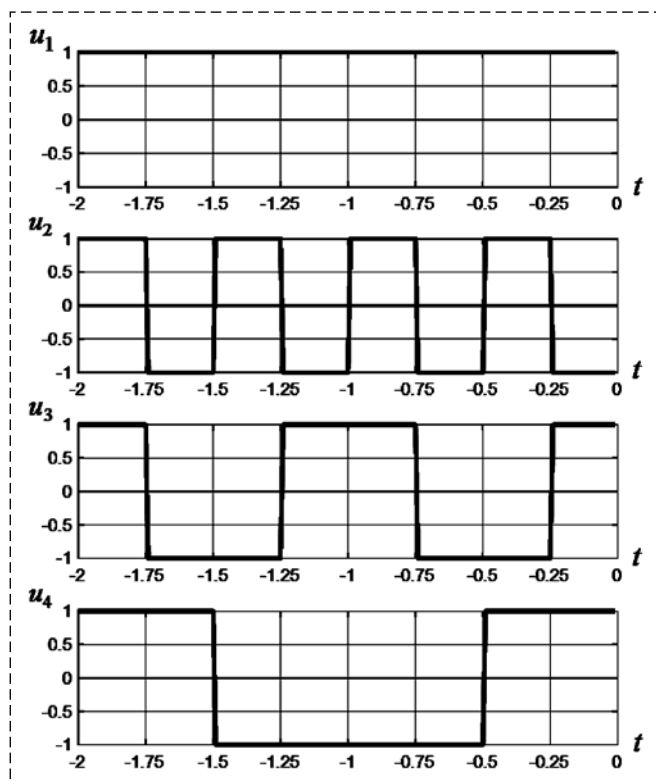


Рис. 2
Fig. 2

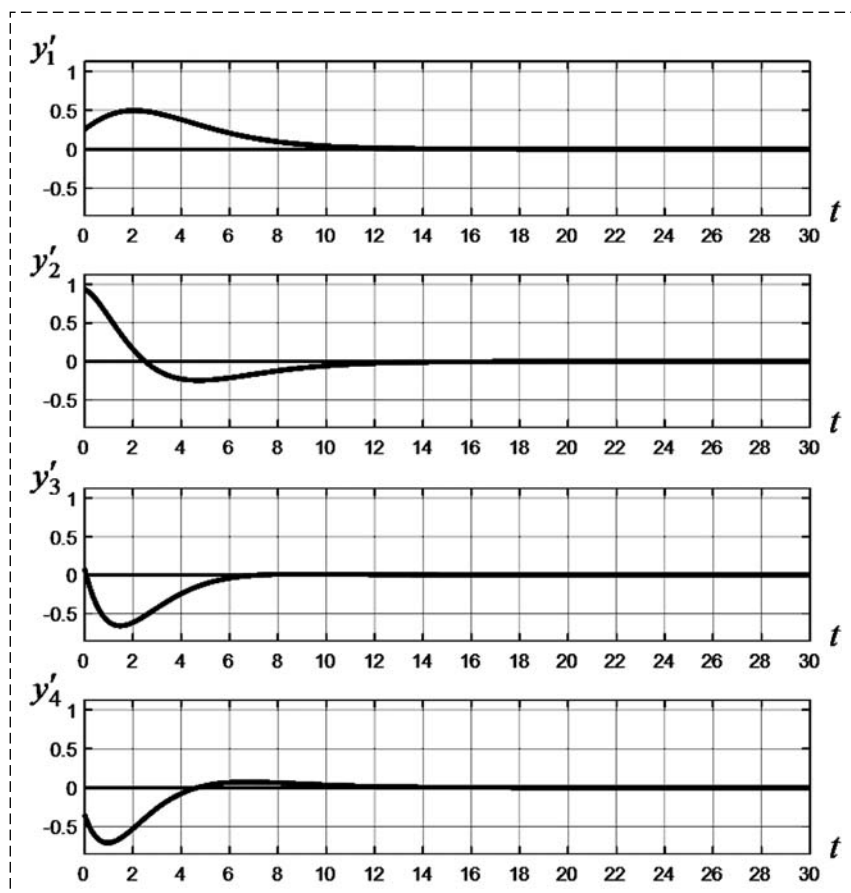


Рис. 3
Fig. 3

Регрессионная схема параметрической идентификации

Как отмечалось выше, в первой серии опытов определяется динамический порядок объекта. Вторая серия опытов направлена на идентификацию параметров ПФ объекта. Опишем регрессионный подход для решения этой задачи.

Для упрощения дальнейшего изложения будем рассматривать идеализированный случай отсутствия помех, так что в переменных состояния объект описывается уравнениями (1) и (2).

Если дана ПФ объекта (3), (4), то его динамику можно представить дифференциальным уравнением, записанным в операторной форме:

$$D(P)y(t) = N(P)u(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (11)$$

где $P = d/dt$ — оператор дифференцирования.

Прямое применение регрессионного формализма к уравнению (11) не представляется возможным, поскольку предполагает диффе-

ренцирование (многократное при $n \geq 2$) входного и выходного сигналов. Данное затруднение предлагается преодолеть посредством интегрального преобразования уравнения (11). Опишем формализм такого преобразования.

Введем обозначения:

- $C^{(k)}[0, T]$ — класс функций, определенных и k раз непрерывно-дифференцируемых на отрезке $[0, T]$;
- $C_0^{(k)}[0, T] \subset C^{(k)}[0, T]$ — подкласс гладких функций, удовлетворяющих граничным условиям

$$f^{(i)}(0) = 0 \text{ при } i = \overline{0, K-1}. \quad (12)$$

Рассмотрим некоторый интегральный оператор свертки:

$$Q_0[f(t)] = \int_0^t q_0(t-\tau)f(\tau)d\tau \quad (13)$$

с ядром $q_0(\cdot) \in C_0^{(n)}[0, T]$. Таким образом, выполняются граничные условия

$$q_0^{(k)}(0) = 0, k = \overline{0, n-1}. \quad (14)$$

Именно этот интегральный оператор применим к дифференциальному уравнению (11).

Введем также интегральные операторы, порожденные оператором (13):

$$Q_k[f(t)] = \int_0^t q_k(t-\tau)f(\tau)d\tau \quad (k = \overline{1, n}), \quad (15)$$

где ядро $q_k(t)$ совпадает с k -й производной функции $q_0(t)$:

$$q_k(t) = q_0^{(k)}(t). \quad (16)$$

Из (16) в силу (14) следует

$$q_k(0) = 0, k = \overline{0, n-1}. \quad (17)$$

Теорема 2. Для функций $f(\cdot) \in C_0^{(n)}[0, T]$ выполняются равенства

$$Q_0[f^{(k)}(t)] = Q_k[f(t)], k = \overline{0, n}. \quad (18)$$

Доказательство. Согласно соотношению (15) для $l = \overline{0, n}$

$$Q_l[f^{(k)}(t)] = \int_0^t q_l(t-\tau)f^{(k)}(\tau)d\tau.$$

Выполняя в правой части данного равенства интегрирование по частям и учитывая ра-

венства (12) и (17), для случая $k \geq 1$ и $l + k = n$ получим

$$\begin{aligned} & \int_0^t q_l(t-\tau)f^{(k)}(\tau)d\tau = \\ & = q_l(t-\tau)f^{(k-1)}(\tau)\Big|_0^t - \int_0^t \frac{d}{d\tau} q_l(t-\tau)f^{(k-1)}(\tau)d\tau = \\ & = q_l(0)f^{(k-1)}(t) - q_l(t)f^{(k-1)}(0) + \\ & + \int_0^t \dot{q}_l(t-\tau)f^{(k-1)}(\tau)d\tau = \int_0^t \dot{q}_l(t-\tau)f^{(k-1)}(\tau)d\tau. \end{aligned}$$

Таким образом, принимая во внимание соотношения (15), (16), имеем

$$Q_l[f^{(k)}(t)] = Q_{l+1}[f^{(k-1)}(t)].$$

Последовательно используя это соотношение для $l = \overline{0, n}$, приходим к равенству (18). Теорема доказана.

Далее понадобится следующая теорема.

Теорема 3. Пусть объект в начальный момент времени находится в нулевом состоянии:

$$\mathbf{x}(0) = 0, \quad (19)$$

и к нему приложено управляющее воздействие $u(\cdot) \in C_0^{(n-1)}[0, T]$, так что при $n \geq 2$

$$u^{(i)}(0) = 0 \text{ при } i = \overline{0, n-2}. \quad (20)$$

Тогда $y(\cdot) \in C^{(n)}[0, T]$, т. е. для выхода объекта выполняются граничные условия

$$y^{(i)}(0) = 0 \text{ при } i = \overline{0, n-1}. \quad (21)$$

Доказательство. Последовательное дифференцирование i раз уравнений (1) и (2) дает

$$\mathbf{x}^{(i+1)}(t) = \mathbf{A}^i \mathbf{x}(t) + \sum_{j=0}^i \mathbf{A}^{i-j} \mathbf{b} u^{(j)}(t); \quad (22)$$

$$y^{(i)}(t) = \mathbf{c} \mathbf{x}^{(i)}(t). \quad (23)$$

Из уравнения (22) в силу (19), (20) следует

$$\mathbf{x}^{(i)}(0) = 0, i = \overline{0, n-1}.$$

Отсюда и из уравнения (23) вытекают равенства (21). Теорема доказана.

Пусть выполнены условия теоремы 3, и мы располагаем интегральными операторами свертки (13) и (15), удовлетворяющими сформулированным выше допущениям. Применим к обеим частям дифференциального уравнения (11) интегральный оператор Q_0 .

Согласно теореме 2:

$$Q_0[y^{(k)}(t)] = Q_k[y(t)], \quad k = \overline{0, n};$$

$$Q_0[u^{(k)}(t)] = Q_k[u(t)], \quad k = \overline{0, n-1}.$$

В итоге получим уравнение в интегральной форме:

$$Q_n[y(t)] + \sum_{i=0}^{n-1} a_i Q_i[y(t)] = \sum_{i=0}^{n-1} b_i Q_i[u(t)]. \quad (24)$$

Введем обозначения

$$\tilde{y}_k(t) = Q_k[y(t)], \quad k = \overline{0, n};$$

$$\tilde{u}_k(t) = Q_k[u(t)], \quad k = \overline{0, n-1}.$$

Тогда уравнение (24) запишется в виде

$$\tilde{y}_n(t) + \sum_{i=0}^{n-1} a_i \tilde{y}_i(t) = \sum_{i=0}^{n-1} b_i \tilde{u}_i(t). \quad (25)$$

Реализация операторов свертки динамическими звеньями

Операторы свертки (13) и (15) можно реализовать посредством линейных стационарных динамических звеньев: в этом случае ядром оператора свертки служит весовая функция соответствующего звена. Обозначим ПФ таких звеньев $H_k(s)$, $k = \overline{0, n}$. Тогда согласно (16) имеем

$$H_k(s) = s^k H_0(s), \quad k = \overline{1, n},$$

причем согласно (14) относительная степень ПФ $H_0(s)$ (т. е. разность между степенями ее знаменателя и числителя) должна быть не меньше n .

В частности, в качестве $H_0(s)$ можно выбрать ПФ апериодического звена n -го порядка:

$$H_0(s) = \frac{1}{(T_H s + 1)^n}, \quad (26)$$

где $T_H > 0$. Тогда

$$H_k(s) = \frac{s^k}{(T_H s + 1)^n}. \quad (27)$$

В описанном способе реализации операторов свертки функции $\tilde{y}_k(t)$ и $\tilde{u}_k(t)$ могут быть получены как выходные сигналы звена с ПФ $H_k(s)$, на вход которого подаются соответственно сигналы $y_k(t)$ и $u_k(t)$.

Инерционные динамические звенья, применяемые для реализации интегральных операторов, могут выполнять еще одну полезную функцию — играть роль низкочастотных фильтров и таким образом позволяют получить еще один важный результат — сглаживание дей-

ствующих в каналах измерения случайных и высокочастотных детерминированных помех.

Применение аппарата линейной регрессии

Перейдем к трактовке экспериментальных данных с позиций регрессионного анализа. В соответствии с уравнением (25) запишем уравнение многофакторной линейной модели регрессии:

$$y_R = \sum_{i=1}^{n_R} \beta_i x_{R,i},$$

где $n_R = 2n$ — размерность модели; $x_{R,i} = -\tilde{y}_{i-1}$, $x_{R,n+i} = \tilde{u}_{i-1}$ ($i = \overline{1, n}$) — регрессоры; $y_R = \tilde{y}_n$ — отклик; $\beta_i = a_{i-1}$, $\beta_{n+i} = b_{i-1}$ ($i = \overline{1, n}$) — коэффициенты регрессии.

Пример 3. Приведем результаты апробации изложенного метода на примере объекта с ПФ (5). Для реализации интегральных операторов свертки применялись динамические звенья с ПФ (26), (27) и постоянной времени $T_H = 0,1$.

В вычислительных процедурах отбирались отсчеты сигналов на временном отрезке длительности $T = 40$ с тактом дискретности (шагом) $T_s = 0,001$.

При решении задачи регрессии использовалась функция `fitlm()` пакета расширения Statistics and Machine Learning Toolbox системы MATLAB. Фрагмент кода ниже поясняет ее применение:

```
mdl = fitlm(XR,YR,'Intercept',false);
kR = mdl.Coefficients(:,1);
kR = table2array(kR);
aE = kR(1:n)';
bE = kR(n + 1:2*n)'
```

Функция

```
mdl = fitlm(XR,YR,'Intercept',false)
```

возвращает линейную регрессионную модель `mdl`. Аргументы функции `XR` и `YR` — соответственно массивы значений регрессоров и откликов. Значение `false` опции `'Intercept'` означает, что в уравнении регрессии постоянная составляющая отсутствует (константа равна нулю).

Посредством метода `mdl.Coefficients()` находятся коэффициенты регрессии в форме табличного массива. Далее с помощью функции `table2array()` полученный табличный массив преобразуется к гомогенному массиву.

Итогом решения являются вектор-столбцы коэффициентов регрессии `aE` и `bE`. В табл. 2

Таблица 2
Table 2

i	0	1	2	3	4
a_i	0,3048	1,6762	3,4095	3,0381	1
$\hat{a}_i$	0,3047	1,6761	3,4102	3,0383	1

Таблица 3
Table 3

i	0	1	2	3
b_i	0,3048	0,3048	0,0762	0
$\hat{b}_i$	0,3047	0,3047	0,0762	0,0000

и табл. 3 представлены истинные коэффициенты числителя и знаменателя tf -модели объекта и результаты его параметрической идентификации согласно описанному методу.

Представленные результаты показывают работоспособность и эффективность предложенного метода идентификации.

Отметим один важный алгоритмический аспект рассматриваемых методов идентификации. Для функции `iddata()` системы MATLAB исходными данными являются дискретные отсчеты некоторого тестового сигнала $u(t)$ и отклика объекта $y(t)$. В противовес этому предлагаемый метод регрессионного оценивания параметров ПФ позволяет обрабатывать данные серии экспериментов и формировать из них обучающую выборку. Тем самым создаются предпосылки для решения вопросов адекватности и точности построения модели на основе методологии машинного обучения.

Заключение

В работе показано, что классические методы активной идентификации динамических объектов могут давать неверные и неприемлемые решения. Закономерно возникает вопрос об их надежности и практической применимости, а также дальнейшем развитии данной области научных исследований. Приведенные в работе результаты позволяют сформулировать важный методологический аспект, который рекомендуется учитывать в новых разработках алгоритмов активной идентификации: для построения адекватных математических моделей необходимо расширять базу экспериментальных данных посредством проведения серии идентификационных экспериментов,

причем здесь могут быть востребованы теоретические установки и инструментальные средства машинного обучения.

Изложенный регрессионный метод структурно-параметрической идентификации линейных динамических объектов может быть полезен и, разумеется, также подлежит дальнейшему критическому анализу и развитию.

Список литературы

1. Сейдж Э. П. Мелса Дж. Л. Идентификация систем управления. М.: Наука, 1974. 248 с.
2. Гроп Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979. 302 с.
3. Дейч А. М. Методы идентификации динамических объектов. М.: Энергия, 1979. 240 с.
4. Современные методы идентификации систем / Под ред. П. М. Эйкхофа. М.: Мир, 1983. 400 с.
5. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 432 с.
6. Толчеев В. О., Ягодкина Т. В. Методы идентификации линейных одномерных динамических систем. М.: МЭИ, 1997. 108 с.
7. Фатуев В. А., Каргин А. В., Понятский В. М. Структурно-параметрическая идентификация динамических систем. Тула: Изд-во ТулГУ, 2003. 156 с.
8. Методы классической и современной теории автоматического управления. В 5 тт. Т. 2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 646 с.
9. Семенов А. Д., Артамонов Д. В., Брюхачев А. В. Идентификация объектов управления. Пенза: Изд-во ПГУ, 2003. 211 с.
10. Дилигенская А. Н. Идентификация объектов управления. Самара: СГТУ, 2009. 136 с.
11. Алексеев А. А., Кораблев Ю. А., Шестопалов М. Ю. Идентификация и диагностика систем. М.: Изд. центр "Академия", 2009. 352 с.
12. Коновалов В. И. Идентификация и диагностика систем. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 156 с.
13. Ефимов С. В., Замятин С. В., Гайворонский С. А. Структурно-параметрическая идентификация объекта управления на основе характеристик переходного процесса // Известия ТПУ. 2010. Т. 317. № 5. С. 107—112.
14. Карташов В. Я., Карташова Л. В., Самойленко С. С. Структурно-параметрическая идентификация динамических объектов в режиме реального времени // Вестник Кемеровского государственного университета. 2015. Т. 1. № 1(61). С. 13—18.
15. Овчаренко В. Н. Структурно-параметрическая идентификация линейной динамической системы с постоянными параметрами // Автоматика и телемеханика. 2020, № 1. С. 3—16.
16. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Структурно-параметрическая идентификация динамических объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 1993. № 1. С. 33—38.
17. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. О неробастности алгоритмов параметрической идентификации в условиях помех // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 12. С. 2—6.
18. Голубов Б. И., Ефимов А. В., Скворцов В. А. Ряды и преобразования Уолша: теория и применения. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 208 с.

Structural Parametric Identification of Linear Dynamic Objects

A. B. Filimonov, filimon_ab@mail.ru,

MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation,
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation,

N. B. Filimonov, nbfilimonov@mail.ru,

Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation,
Trapeznikov Institute of Control Problems, RAS, Moscow, 117997, Russian Federation,

Corresponding author: **Filimonov Nikolay B.**, Professor, Dr. Sci. Tech.,
Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

Accepted on February 12, 2022

Abstract

The problem of structural-parametric identification of linear stationary dynamic objects under conditions of active experiments is considered. The question of the adequacy of dynamic models based on the analysis of the object's response to a typical test impact is investigated. These studies allow us to formulate an important methodological aspect that is recommended to be taken into account in new developments of active identification algorithms. In this paper it is shown that in real conditions of interference, the classical methodology of constructing the transfer function of an object by means of the analysis of data single experiment, i.e. the response to a test effect can give incorrect results. In this regard, another approach is proposed — to form the base of the experimental data starting from a series of identification experiments, and because of its to investigate the dynamic structure of free and forced movements of the object. The ideological basis of this approach consists of the following solutions: the principle of "probing" the space of states of an object in order to determine its dynamic order; the mechanism of excitation of free movements in the object by means of finite control actions; the integral-operator form of representation of the dynamics of the object, which avoids the need for differentiation of input and output signals; the apparatus of linear regression for parametric identification of the transfer function of the object. On the base the given approach a new method of structural-parametric identification of linear stationary dynamic objects is developed and investigated. The presented results and computer approbation in the MATLAB environment have shown the operability and effectiveness of this identification method.

Keywords: linear stationary dynamic objects, transfer function, structural-parametric identification, adequacy of the model

For citation:

Filimonov A. B., Filimonov N. B. Structural Parametric Identification of Linear Dynamic Object, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 5, pp. 227—235.

DOI: 10.17587/mau.23.227-235

References

1. **Sage E. P., Melsa J. L.** Identification of Control Systems, Moscow, Nauka, 1974, 248 p. (in Russian).
2. **Grop D.** Methods of Identification of systems, Moscow, Mir, 1979, 302 p.
3. **Deich A. M.** Methods of Identification of Dynamic Objects, Moscow, Energiya, 1979, 240 p. (in Russian).
4. **Eickhoff P. M.** ed. Modern Methods of Identification of Systems, Moscow, Mir, 1983, 400 p. (in Russian).
5. **Lyung L.** Identification of Systems. Theory for the User, Moscow, Nauka, 1991, 432 p.
6. **Tolcheev V. O., Yagodka T. V.** Methods of Identification of Linear One-Dimensional Dynamical Systems, Moscow, MEI, 1997, 108 p. (in Russian).
7. **Fatuev V. A., Kargin A. V., Ponyatsky V. M.** Structural-Parametric Identification of Dynamical Systems, Tula, TulSU Publishing House, 2003, 156 p. (in Russian).
8. **Pupkov K. A., Egupov N. D.** Methods of Classical and Modern Theory of Automatic Control. V. 2: Statistical Dynamics and Identification of Automatic Control Systems, Moscow, Publishing House of the BMSTU, 2004, 646 p. (in Russian).
9. **Semenov A. D., Artamonov D. V., Bryukhachev A. V.** Identification of Control Objects, Penza, Publishing House of PSU, 2003, 211 p. (in Russian).
10. **Diligenskaya A. N.** Identification of Management Objects, Samara, SSTU, 2009, 136 p. (in Russian).
11. **Alekseev A. A., Korablev Yu. A., Shestopalov M. Yu.** Identification and Diagnostics of Systems, Moscow, Publishing house of the Center "Academy", 2009, 352 p. (in Russian).
12. **Konovalov V. I.** Identification and Diagnostics of Systems, Tomsk, TPU Publishing House, 2010, 156 p. (in Russian).
13. **Efimov S. V., Zamyatin S. V., Gaivoronsky S. A.** Structural and Parametric Identification of the Control Object Based on the Characteristics of the Transition Process, *Izvestiya TPU*, 2010, vol. 317, no. 5, pp. 107—112 (in Russian).
14. **Kartashov V. Ya., Kartashova L. V., Samoylenko S. S.** Structural and Parametric Identification of Dynamic Objects in Real-Time Mode, *Bulletin of the Kemerovo SU*, 2015, vol. 1, no 1(61), pp. 13—18 (in Russian).
15. **Ovcharenko V. N.** Structural-Parametric Identification of a Linear Dynamic System with Constant Parameters, *Avtomatika i Telemekhanika*, 2020, no. 1, pp. 3—16 (in Russian).
16. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** Structural-parametric identification of dynamic objects, *Journal of Instrument Engineering*, 1993, no. 1, pp. 33—38 (in Russian).
17. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** On the Nonrobustness of Parametric Identification Algorithms in Interference Conditions, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2008, no. 12, pp. 2—6 (in Russian).
18. **Golubov B. I., Efimov A. V., Skvortsov V. A.** Walsh Series and Transformations: Theory and Applications, Moscow, LKI Publishing House, 2008, 208 p. (in Russian).