

УДК 621.391

# ИЕРАРХИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**С.Л. Подвальный**

*Воронежский государственный технический университет*  
Россия, 394026, Воронеж, Московский проспект, 14  
E-mail: [spodvalny@yandex.ru](mailto:spodvalny@yandex.ru)

**Е.М. Васильев**

*Воронежский государственный технический университет*  
Россия, 394026, Воронеж, Московский проспект, 14  
E-mail: [vgtu-aits@yandex.ru](mailto:vgtu-aits@yandex.ru)

**Ключевые слова:** нелинейные динамические системы, параметрическая идентификация, иерархическая структура.

**Аннотация:** Работа посвящена задаче адаптивной идентификации параметров нелинейных динамических систем. Построение моделей таких систем в виде сосредоточенной однокаскадной структуры, основанной на концепции «черного ящика», сталкивается с проблемой некоммутативности нелинейных и линейных динамических элементов системы. С целью повышения адекватности получаемых моделей предлагается решать задачу нелинейной идентификации на основе иерархически-модульной структуры процесса адаптации, предполагающей формирование каскадной конфигурации модели и использование вектора состояния реальной системы. Представлены результаты экспериментальной проверки нескольких вариантов каскадной конфигурации модели, подтверждающие эффективность предложенного подхода.

## 1. Введение

Идентификация нестационарных параметров нелинейных динамических объектов является неотъемлемой частью алгоритмов современных адаптивных систем автоматического управления [1]. Расширение областей применения этих систем, в частности, использование адаптивных фильтров для компенсации нелинейных искажений в каналах телекоммуникационных систем, потребовало существенного снижения уровня ошибок идентификации [2-4]. Распространенные в настоящее время инженерные методы нелинейной идентификации, использующие общий унифицированный подход к решению этой задачи [5-8], не связанный с априорными предположениями о структуре объекта, не в состоянии обеспечить качественный скачок в улучшении точности идентификации. В связи с этим возникает предположение, что для снижения ошибок нелинейной идентификации следует отказаться от построения моделей на основе концепции «черного ящика» и осуществлять идентификацию не только по выходу объекта, но по полному вектору его состояния [9, 10]. Воспроизведение в модели внутренней структуры объекта открывает возможность организовать процесс идентификации различными способами, например, в виде иерархической структуры с параллельными вычислениями

ми. Предлагаемая работа посвящена практической проверке этого предположения для случая детерминированной идентификации.

## 2. Сравнительный анализ моделей нелинейной идентификации

### 2.1. Базовая модель с сосредоточенными характеристиками

В качестве нелинейной динамической системы рассматривался двухкаскадный объект, содержащий последовательно включенные элементы  $f_1(x)$ ,  $w_1(j\omega)$ ,  $f_2(x_2)$ ,  $w_2(j\omega)$ , (1)-(4), рис. 1а:

$$(1) \quad f_1(x(j\omega)) = 2.5(1 - e^{-0.7x(j\omega)\text{sign}(x(j\omega))}) \cdot \text{sign}(x(j\omega));$$

$$(2) \quad y_1(j\omega) = \frac{k_1}{1 + j\omega T_1} \cdot f_1(x(j\omega));$$

$$(3) \quad f_2(y_1(j\omega)) = 1.25(1 - e^{-0.8y_1(j\omega)\text{sign}(y_1(j\omega))}) \cdot \text{sign}(y_1(j\omega));$$

$$(4) \quad y(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega T_2} \cdot f_2(y_1(j\omega)),$$

в которых  $x(j\omega)$  и  $y(j\omega)$  – спектры сигналов на входе и выходе объекта;  $f_1(x_1)$ ,  $f_2(x_2)$  – нелинейные звенья с нечетными характеристиками;  $w_1(j\omega)$ ,  $w_2(j\omega)$  – линейные динамические звенья первого порядка;  $k_1$  – коэффициент передачи динамического звена  $w_1(j\omega)$ ;  $T_1, T_2$  – постоянные времени звеньев  $w_1(j\omega)$  и  $w_2(j\omega)$  соответственно.

Дискретная модель идентификации с сосредоточенными характеристиками (рис. 1б) использовала аппроксимацию нелинейности полиномом  $\hat{F}(x_1)$  четвертого порядка (5) и две разностные схемы первого порядка для линейной части (6), (7):

$$(5) \quad \hat{F}(x) = \sum_{i=1}^4 h_i x \cdot |x|^{i-1} = h_1 x + h_2 x \cdot |x| + h_3 x \cdot |x|^2 + h_4 x \cdot |x|^3;$$

$$(6) \quad q(i+1) = \hat{F}(x(i)) \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_1}}) + q(i) \cdot e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_1}} \cdot \hat{k}_1;$$

$$(7) \quad y(i+1) = q(i)(1 - e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_2}}) + y(i) \cdot e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_2}},$$

где  $h_i$ ,  $i = \overline{1,4}$ ;  $\hat{T}_1, \hat{T}_2$ ,  $\hat{k}_1$  – идентифицируемые параметры модели.

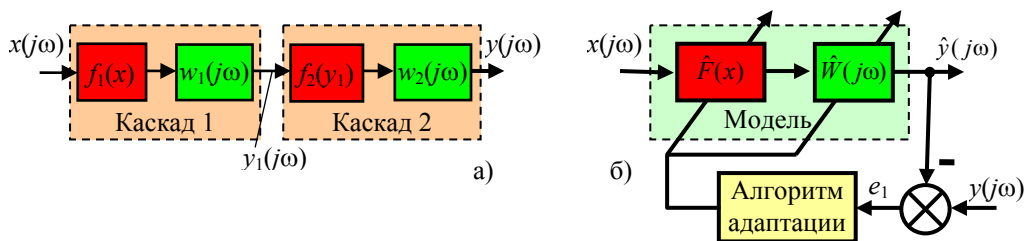


Рис. 1. Тестовый нелинейный динамический объект (а) и базовая модель (б) идентификации его параметров.

Критерием качества идентификации выбрано относительное значение среднего квадрата отклонения последовательности  $\hat{y}(i)$  на выходе модели от соответствующих значений  $y(i)$  на выходе реального объекта (8):

$$(8) \quad e_1(h_1, h_2, h_3, h_4, \hat{T}_1, \hat{T}_2, \hat{k}_1) = 10 \log \left[ \frac{\sum_{i=1}^m (y(i) - \hat{y}(i))^2}{\sum_{i=1}^m y^2(i)} \right] \rightarrow \min,$$

$m$  – объем выборки данных, используемой для идентификации,  $i = \overline{1, m}$ .

Минимизация функции (8) проводилась методом сопряженных градиентов и обеспечила значение критерия  $e_{1, \min} = -22$  дБ. Найденное значение  $e_{1, \min}$  будем использовать в качестве базы для сравнения с другими вариантами модели.

## 2.2. Каскадная модель системы с идентификацией по выходу

Простейшим вариантом использования априорной информации о строении объекта является воспроизведение в модели его двухкаскадной структуры, рис. 2. При этом по-прежнему будем использовать идентификацию по выходу объекта  $y(i)$ .

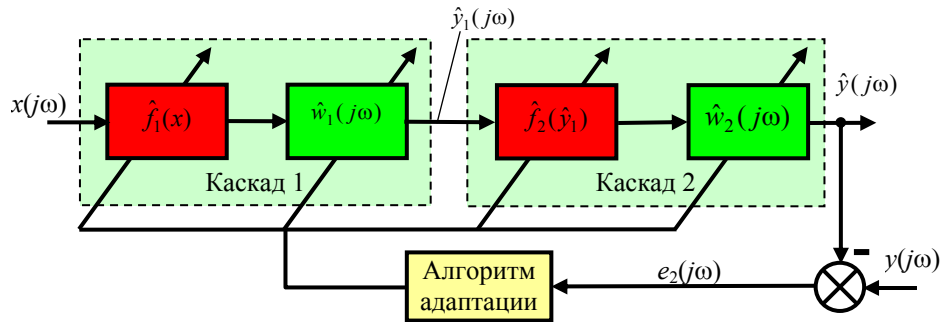


Рис. 2. Каскадная модель системы с идентификацией по выходу

Модели нелинейностей (9), (10) каждого каскада имеют второй порядок:

$$(9) \quad \hat{f}_1(x) = \sum_{i=1}^2 h_{1i} x \cdot |x|^{i-1} = h_{11} x + h_{12} x \cdot |x|,$$

$$(10) \quad \hat{f}_2(\hat{y}_1) = \sum_{i=1}^2 h_{2i} \hat{y}_1 \cdot |\hat{y}_1|^{i-1} = h_{21} \hat{y}_1 + h_{22} \hat{y}_1 \cdot |\hat{y}_1|.$$

Инерционные свойства каскадов воспроизведены разностными схемами (11), (12) первого порядка:

$$(11) \quad \hat{y}_1(i+1) = \hat{f}_1(x(i)) \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_1}}) + \hat{y}_1(i) \cdot e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_1}} \cdot \hat{k}_1;$$

$$(12) \quad \hat{y}(i+1) = \hat{f}_2(\hat{y}_1(i)) \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_2}}) + \hat{y}(i) \cdot e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_2}},$$

где  $z$  – сигнал на выходе первого каскада;  $\hat{f}_1, \hat{f}_2, \hat{T}_1, \hat{T}_2, \hat{k}_1$  – оценки соответствующих параметров заданной нелинейной системы.

Функция цели идентификации этого варианта модели имеет вид (13):

$$(13) \quad e_2(h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}, \hat{T}_1, \hat{T}_2, \hat{k}_1) = 10 \log \left[ \frac{\sum_{i=1}^m (y(i) - \hat{y}(i))^2}{\sum_{i=1}^m y^2(i)} \right] \rightarrow \min.$$

Полученное значение  $e_{2, \min} = -24$  дБ незначительно отличается от базового варианта  $e_{1, \min} = -22$  дБ. Причина этого в том, что при переходе к каскадной структуре модели не была использована возможность организовать процесс идентификации по вектору состояния объекта.

### 2.3. Каскадная модель системы с идентификацией по вектору состояния

Структура покаскадной идентификации по вектору состояния системы показана на рис. 3. В этой структуре первый каскад занимает более высокий уровень иерархии по отношению ко второму – выходному каскаду.

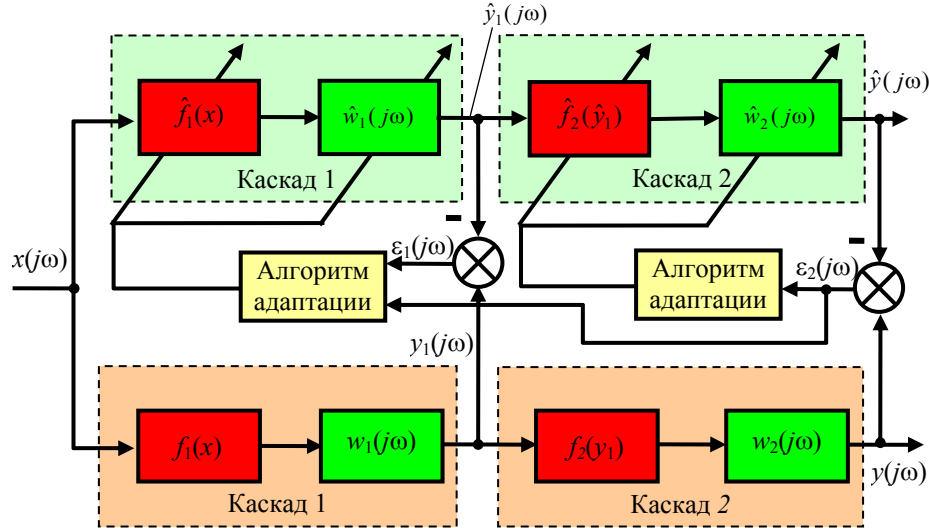


Рис. 3. Каскадная модель системы с идентификацией по вектору состояния.

Процесс идентификации осуществляется одновременно по каждому каскаду по отдельным функциям цели. Для первого каскада функция цели  $\alpha$  является составной (14):

$$(14) \quad \alpha = \sqrt{b_1 \cdot \varepsilon_1^2 + b_2 \cdot \varepsilon_2^2} \rightarrow \min ,$$

где  $b_1, b_2$  – весовые коэффициенты;  $\varepsilon_1 = \varepsilon_1(h_{11}, h_{12}, h_{13}, \hat{T}_1, \hat{k}_1) = \sum_{i=1}^m (y_1(i) - \hat{y}_1(i))^2$ .

Величина  $\varepsilon_2$  (15) отражает итоговую ошибку идентификации  $\varepsilon_3$ :

$$(15) \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_2(h_{21}, h_{22}, \hat{T}_2) = \sum_{i=1}^m (y(i) - \hat{y}(i))^2 \rightarrow \min .$$

Результирующий показатель качества идентификации определялся в виде (16):

$$(16) \quad \varepsilon_3(h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, \hat{T}_1, \hat{T}_2, \hat{k}_1) = 10 \log \left[ \frac{\sum_{i=1}^m (y(i) - \hat{y}(i))^2}{\sum_{i=1}^m y^2(i)} \right] \rightarrow \min .$$

Результат идентификации:  $\varepsilon_{3, \min} = -31$  дБ.

Сравнительные характеристики рассмотренных выше вариантов моделей идентификации представлены в таблице.

Таблица 1. Сравнительные характеристики моделей идентификации

Вариант модели	Модель с сосредоточенными характеристиками	Каскадная модель с идентификацией по выходу	Каскадная модель с идентификацией по вектору состояния
Относительная ошибка, дБ	-22	-24	-31

Полученный результат подтверждает возможность существенного снижения ошибки нелинейной идентификации при использовании иерархически-модульной организации поиска параметров модели [11-13].

### 3. Заключение

Стремление к унификации методов нелинейной параметрической идентификации с адаптацией по выходу системы в кибернетическом плане соответствует использованию концепции «черного ящика» без учета доступной информации о внутренней структуре объекта. Такой подход к решению рассматриваемой задачи затрудняет получение моделей с низким уровнем ошибок идентификации.

Воспроизведение в модели внутренней структуры нелинейного объекта дает возможность перейти к иерархически-модульной организации процесса идентификации по вектору состояния системы и обеспечивает существенное снижение ошибки идентификации по сравнению с вариантом адаптации модели по выходному сигналу системы. При этом происходит декомпозиция многомерной задачи идентификации на подзадачи меньшей размерности, решение которых осуществляется одновременно в реальном масштабе времени.

В методологическом плане полученные результаты отражают возможности синергетического подхода к построению и идентификации сложных динамических систем.

### Список литературы

1. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д.Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004. 640 с.
2. Diniz P.S.R. Adaptive Filtering Algorithms and Practical Implementation. New York: Springer Science, Business Media, 2013. 230 p.
3. Giri F., E.W. Block-Oriented Nonlinear System Identification. Heidelberg: Springer, 2010. 431 p.
4. Proletarsky A.V., Neuspın K.A. Adaptive filtering for navigation systems of robot-aerocraft // Science & military. 2010. Vol. 5. P. 75-80.
5. Макаров В.В., Жиров М.В., Куроткин В.А. Моделирование и исследование рекуррентных алгоритмов идентификации нестационарных параметров объектов управления // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. ВСПУ-2014. Москва 16-19 июня 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 2679-2684.
6. Павленко В.Д., Павленко С.В. Методы детерминированной идентификации нелинейных систем в виде моделей Вольтерра // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. ВСПУ-2014. Москва 16-19 июня 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 2830-2841.
7. Сакрутина Е.А., Бахтадзе Н.Н. Идентификация систем на основе вейвлет-анализа // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. ВСПУ-2014. Москва 16-19 июня 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 2868-2889.
8. Чадеев В.М. Цифровая идентификация нелинейных динамических объектов // Автоматика и телемеханика. 2004. № 12. С. 85-93.
9. Эйкофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 680 с.
10. Пашенко А.Ф., Пашенко Е.Ф. Идентификация нелинейных систем в классе блочно-ориентированных моделей // Информатика и системы управления. 2010. № 4 (26). С. 149-160.
11. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Многоальтернативные системы интеллектуального управления: принципы построения и пути реализации // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. ВСПУ-2014. Москва 16-19 июня 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 996-1007.
12. Podvalny S L, Vasiljev E.M., Varabanov V.F. Models of multi-alternative control and decision-making in complex systems // Automation and Remote Control . 2014. Vol. 75, No. 10. P. 1886-1890.
13. Podvalny S L, Vasiljev E.M. Multi-alternative control of large systems // 13th Int. Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”. St. Petersburg. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 161.