УДК 621.391:519.21

СТРУКТУРНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ГИСТЕРЕЗИСОМ

Н.Н. Карабутов
МИРЭА - Российский технологический университет
Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, д. 78
E-mail: kn22@yandex.ru

Ключевые слова: структурная идентификация, гистерезис, виртуальная структура, сектор, секущая, структурная идентифицируемость

Аннотация: Предложен метод структурной идентификации динамических систем с гистерезисом в условиях неопределенности. Метод основан на выделении специального множества, содержащего информацию о свойствах нелинейной части системы. Введена виртуальная структура, позволяющая принимать решение о структуре гистерезиса. Введено понятие структурной идентифицируемости нелинейных динамических систем. Структурная идентифицируемость является необходимым условие в восстановления формы гистерезиса.

1. Введение

Проблема структурной идентификации занимает одно из основных мест в теории управления. Несмотря на полученные значимые результаты в теории параметрического оценивания, продвижения в области выбора структуры модели является не таким впечатляющим. Исследования в области структурной идентификации требуют дальнейшего изучения. Проблема не получили окончательного решения. Такое состояние проблемы структурной идентификации (СИ) можно объяснить сложностью математической формулировки и отсутствием регулярных методов ее решения. В настоящее время большинство подходов к СИ основано на применении переборных процедур на заданном классе моделей или аппроксимации нелинейной части системы на классе полиномов. Основой указанных подходов является параметрическая идентификация.

Наиболее широкое распространение получили методы идентификации структуры систем, описываемых интегральными уравнениями Винера и Винера-Гаммерштейна [1-4]. В [1] структура модели задается априори. Нелинейность описывается полиномиальной функцией второго порядка. Основные достоинства Винера и Винера-Гаммерштейна моделей: а) приведение их к регрессионной форме; б) применение параметрических методов идентификации для их построения. Применение моделей Винера и Винера-Гаммерштейна дано в [2]. Авторы учитывают априорную информацию о структуре нелинейности. Для описания нелинейности применяется кусочно-линейная аппроксимация. Оценки параметров нелинейной функции получены с помощью кусочно-линейного метода наименьших квадратов. Различные подходы к идентификации нелинейных объектов с помощью моделей Винера и Винера-Гаммерштейна рассмотрены в [3, 4].

Большое количество публикаций посвящено идентификации систем с гистерезисом (см., например [5-8]). Одной из наиболее часто применяемых зависимостей для описания гистерезиса является модель Боука-Вена (БВ). В [6-8], как и в рассмотренных выше работах, предлагаются различные параметрические модели, аппроксимирующие параметры гистерезиса. Так в [6] рассмотрен вариант нейросетевой модели Вольтера-Винера для оценки параметров гистерезиса динамической системы второго порядка. Модель описывается регрессионным уравнением. Для идентификации параметров модели предложен адаптивный алгоритм. В [7] разработаны модели для аппроксимации симметричного и несимметричного гистерезиса с использованием кусочно-линейных функций. Кроме модели Боука-Вена для описания гистерезиса применяются другие зависимости. Примеры параметрической идентификации таких моделей гистерезиса приведены в [9-11].

Итак, анализ публикаций показывает, что задача структурной идентификации систем с гистерезисом требует дальнейшего изучения. Сейчас основу исследований составляют разработки различных методов аппроксимации нелинейности и учет априорной информации. Некоторые авторы исследовали вопросы структурной идентификации (выбор виды нелинейной функции, типа нелинейности) для объектов с известным классом нелинейностей. Эти выводы справедливы и для класса гистерезисных нелинейностей.

Ниже предлагается подход к СИ динамических систем с гистерезисом в условиях неопределенности. Он основан на результатах работы [12].

2. Постановка задачи

Рассмотрим динамическую систему

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + \varphi(y)I + Bu, \\ y &= C^T X, \end{aligned} \tag{1}$$

где $u \in R$, $y \in R$ — вход и выход системы; $A \in R^{q\times q}$, $B \in R^q$, $I \in R^q$, $C \in R^q$ — матрицы соответствующих размерностей; $\varphi(y)$ — скалярная нелинейная функция, принадлежащая к классу гистерезисных $\mathcal{F}_h$; $I = \left[0, 0, \ldots, 0, 1\right]^T$. Матрица A является гурвицевой.

Функция $\varphi(y)$ описывается алгебраическим уравнением и принадлежит множеству

$$\chi \in \mathcal{F}_\varphi = \left\{\gamma_1\xi^2 \le \varphi(\xi)\xi \le \gamma_2\xi^2,\ \xi \ne 0,\ \varphi(0) = 0,\ \gamma_1 \ge 0, \gamma_2 < \infty\right\}, \tag{2}$$

где $\xi \in R$ — вход нелинейного элемента.

Пусть для системы (1) имеется множество данных

$$\mathrm{I}_o = \left\{u(t), y(t)\ \ t \in J = \left[t_0, t_k\right]\right\}. \tag{3}$$

Задача: необходимо определить вид и параметры функции $\varphi(y) \in \mathcal{F}_h$ на основе анализа и обработки множества I_o (3).

3. Формирование множества $\mathrm{I}_{N,g}$ и структуры $\mathcal{S}_{ey}$

Так как параметрические методы формирования класса $\mathcal{F}_h$ в условиях неопределенности не работают, то не основе анализа (3) необходимо получить данные, которые содержат информацию о нелинейности в (1). Воспользуемся подходом, предложенным в [12]. Он позволяет получить вспомогательное множество

$$\mathrm{I}_{N,g} = \left\{ y(t),\, e(t) \;\; t \in J_g \right\},$$

где $e \in R$ — переменная, отражающая ошибку аппроксимации $\dot{y}$ с помощью модели, предложенной в [12]; $J_g \subset R$ — временной интервал, соответствующий установившемуся движению системы (1).

Далее рассматриваем множество $\mathrm{I}_{N,g}$ в пространстве $\mathcal{P}_{ye} = (y, e)$. Для решения задачи СИ в $\mathcal{P}_{ye}$ введем функцию $\Gamma_{ey} : \{ y(t) \} \to \{ e(t) \}$ и соответствующую ей структуру $\mathcal{S}_{ey}$. Предположим, что структура $\mathcal{S}_{ey}$ является замкнутой и h_{δ_h}-идентифицируемой [12]. Пусть $\mathcal{S}_{ey} = F^l_{\mathcal{S}_{ey}} \cup F^r_{\mathcal{S}_{ey}}$, где $\mathcal{F}^l_{\mathcal{S}_{ey}}, \mathcal{F}^r_{\mathcal{S}_{ey}}$ — левый и правый фрагменты $\mathcal{S}_{ey}$.

4. Оценка класса нелинейности $\varphi(y)$

Рассмотрим классы однозначных $\mathcal{F}_{ov}$ и многозначных $\mathcal{F}_{mv}$ нелинейностей. Эти классы содержат большое множество нелинейных функций. Выполним фрагментацию структуры $\mathcal{S}_{ey}$ на основе анализа подмножества $\mathrm{I}_\varphi \subseteq \mathrm{I}_{N,g}$. I_φ адекватно отражает изменение функции $\chi = \varphi(y)$ в структурном пространстве $\mathcal{P}_{ye}$. Способ выделения подмножества I_φ описан в [12, 13]. I_φ соответствуют фрагменты $\mathcal{FR}_{\varphi,j} \subset \mathcal{S}_{ey}$. $\mathcal{FR}_{\varphi,j}$ определены на множествах $\mathrm{I}^j_y \subset \mathrm{I}_\varphi$, которые отражают особенности функции χ.

Рассмотрим фрагмент $\mathcal{FR}^i_\varphi \subset \mathcal{S}_{ey}$, заданный на I^i_φ для $\exists i \geq 1$. Применим метод наименьших квадратов и на I^i_φ определим секущую $\overline{\gamma}_i$ для $\mathcal{FR}^i_\varphi$

(4) $$\overline{\gamma}_i = \overline{\gamma}\left(y(t) \right) = a_i y(t) + b_i .$$

Вычислим на $\mathrm{I}^i_y \subset \mathrm{I}_\varphi$ среднее значение $\overline{y}_i$ для $y(t)$. Пусть $\overline{y}_i$ — центр $\mathcal{FR}^i_\varphi$ на $\mathrm{I}^i_y \subset \mathrm{I}_\varphi$. Проведем через точку $\overline{y}_i$ на оси y на плоскости (y, e) прямую $\overline{\gamma}_i$, параллельную оси ординат. На пересечении этой прямой с $\overline{\gamma}_i$ получим точку $\alpha = \left(\overline{y}_i, e(\overline{y}_i) \right)$. Через точку $\alpha = \left(\overline{y}_i, e(\overline{y}_i) \right)$ проведем прямые

$$\overline{\gamma}_{i,-} = a_{i,-} y(t) + b_i ,\; \overline{\gamma}_{i,+} = a_{i,+} y(t) + b_i ,$$

где $a_{i,+(-)} = a_i \pm c_i$, $c_i > 0$ — заданная величина.

Получим множество $\mathrm{Sec}_{a_i}\left(\mathcal{FR}^i_\varphi \right) = \left(\overline{\gamma}_{i,-}, \overline{\gamma}_{i,+} \right)$, которое будем называть секторным множеством для $\mathcal{FR}^i_\varphi$. Сектор $\mathrm{Sec}\left(\mathcal{FR}^i_\varphi \right)$ представим в виде

$$\mathrm{Sec}\left(\mathcal{FR}^i_\varphi \right) = \mathrm{Sec}_{\alpha,l}\left(\mathcal{FR}^i_\varphi \right) \cup \mathrm{Sec}_{\alpha,r}\left(\mathcal{FR}^i_\varphi \right),$$

где $\mathrm{Sec}_{\alpha,l}\left(\mathcal{FR}^i_\varphi \right), \mathrm{Sec}_{\alpha,r}\left(\mathcal{FR}^i_\varphi \right)$ — подмножества $\mathrm{Sec}\left(\mathcal{FR}^i_\varphi \right)$, которые расположены левее и правее точки α.

Построим секущие

(5) $$\overline{\gamma}_{i,l}=a_{i,l}y(t)+b_{i,l}\,,\ \overline{\gamma}_{i,r}=a_{i,r}y(t)+b_{i,r}$$

для каждой из частей $\mathcal{FR}^{i}_{\varphi,l(r)}$ фрагмента $\mathcal{FR}^{i}_{\varphi}$. Здесь $a_{i,l(r)},b_{i,l(r)}$ — некоторые числа. Далее применим следующую модификацию утверждения из [12]. Пусть существует такое $\delta_i>0$, что

(6) $$\left|a_{i,l}-a_i\right|\le\delta_i\,,\ \left|a_{i,r}-a_i\right|\le\delta_i\,.$$

Теорема 2. *Пусть для системы (1) в пространстве $\mathcal{P}_{ye}=(y,e)$: а) получены структуры $\mathcal{FR}^{i}_{\varphi,r}$, $\mathcal{FR}^{i}_{\varphi,l}$, описываемые отображениями $\Gamma_{ey,l(r)}:\{y\}_{i,l(r)}\to\{e\}_{i,l(r)}$, где $\{y\}_{i,l(r)}\subset\mathrm{I}^{i}_{\varphi}$, $\{e\}_{i,l(r)}\subset\mathrm{I}^{i}_{\varphi}$, и соответствующие им секущие (5); б) для $\mathcal{FR}^{i}_{\varphi}$ определена секущая (4). Тогда: 1) функция $\varphi(y)\in\mathcal{F}_{ov}$, если выполняется (6); 2) функция $\varphi(y)\in\mathcal{F}_{mv}$, если (6) не выполняется.*

5. Оценка структуры гистерезиса

Задача структурной идентификации нелинейных систем является сложной. Общий подход для ее решения предложить не удается. Каждый класс нелинейностей имеет свои особенности, которые отражаются на поведении траекторий системы. Выявление этих особенностей в условиях неопределенности дает детальный анализ S_{ey}. Несмотря на указанные сложности, приведем процедуру оценки структуры гистерезиса. Она основана на феноменологическом анализе S_{ey}.

Процедура SP оценки структуры гистерезиса $\varphi(y)$.

1) Получить переменную $e(t)$ на основе анализа множества I_o. 2) Проверить h-идентифицируемость [12] системы (1) на основе анализа фазового портрета S и S_{ey}. Если система (1) h-идентифицируема, то прейти к шагу 3. В противном случае закончить работу процедуры. 3) Проверить условие структурной идентифицируемости системы (1). Если система (1) h_{δ_h}-идентифицируема, то перейти к шагу 4, иначе конец процедуры. 4) Определить принадлежность $\varphi(y)$ к классу многозначных функций. Применить для анализа структуры S_{ey} метод, предложенный в [14]. Если принимается положительное решение, то прейти к шагу 5 иначе конец процедуры. 5) Выполнить феноменологический анализ структуры S_{ey} для выявления особенностей изменения $\varphi(y)$.

Примеры реализации предложенного алгоритма и приведены в [13, 14].

Замечание 1. h-идентифицируемость определяет возможность идентификации исходной системы (1). Она требует выполнения условия постоянства возбуждения информационного множества I_o

Замечание 21. h_{δ_h}-идентифицируемость определяет возможность идентификации структуры нелинейной части системы (1).

6. Заключение

Предложен подход к структурной идентификации динамической системы с гистерезисом. Он основан на анализе экспериментальной информации и выделении множества данных, которое содержит данные о нелинейной части системы. Анализ виртуальной структуры S_{ey}, отражающей свойства этой части подсистемы, позволяет принять решение о классе нелинейности и оценить параметры нелинейной функции. Предложена процедура оценки структуры нелинейности.

Список литературы

1. Шаншиашвили В.Г. Структурная идентификация нелинейных динамических систем на множестве непрерывных блочно-ориентированных моделей // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва 16-19 июня 2014 г.: Труды. [Электронный ресурс] М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 3018-3028.
2. Van Pelt T. H., Bernstein D.S. Nonlinear system identification using Hammerstein and non-linear feedback models with piecewise linear static maps // International journal control. 2001. Vol. 74. No. 18. P. 1807-1823.
3. Rugh W.J. Nonlinear system theory: The Volterra/Wiener approach. The Johns Hopkins University Press, 1981. 338 p.
4. Dimitriadis G. Investigation of nonlinear aeroelastic systems. Thesis of degree the doctor of philosophy. University of Manchester, 2001. 317 p.
5. Kerschen G., Worden K., Vakakis A., Golinval J. Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics // Mechanical systems and signal processing. 2006. Vol. 20. P. 505-592.
6. Smith A.W., Masri S.F., Kosmatopoulos E.B., Chassiakos A.G., Caughey T.K. Development of adaptive modeling techniques for non-linear hysteretic systems // International journal of non-linear mechanics. 2002. Vol. 37, No. 8. P. 1435-1451.
7. Vörös J. Modeling and identification of hysteresis using special forms of the Coleman–Hodgdon model // Journal of electrical Engineering. 2009. Vol. 60, No. 2. P. 100-105.
8. Worden K., Manson G. On the identification of hysteretic systems. Part I: an Extended Evolutionary Scheme // Proceedings of the IMAC-XXVIII February 1–4, 2010, Jacksonville, Florida USA. 9 p.
9. Kuhnen K. Modeling, identification and compensation of complex hysteretic nonlinearities: A modified Prandtl-Ishlinskii approach // European Journal of Control. 2003. Vol. 9, No. 8. P. 407-418.
10. Furukawa T., Ito M., Izaw K., Noori M. N. System identification of base-isolated building using seismic response data // Journal of engineering mechanics. 2005. Vol. 131. P. 268-275.
11. Ding Y., Zhao B.Y., Wu B. Structural system identification with extended Kalman filter and orthogonal decomposition of excitation // Mathematical Problems in Engineering. 2014. Vol. 2014. P. 1-10.
12. Karabutov N. Structural identification of dynamic systems with hysteresis // International Journal of intelligent systems and applications. 2016. Vol. 8, No. 7. P. 1-13.
13. Карабутов Н.Н. Структуры в задачах идентификации: Построение и анализ. М.: ЛЕНАНД. 2018. 312 с.
14. Karabutov N. Structural identification of nonlinear static system on basis of analysis sector sets // International journal of intelligent systems and applications. 2014. Vol. 6, No. 1. P. 1-10.