УДК 681.876.2

А.И. Михалев, А.И. Гуда

АДАПТИВНО-ПОИСКОВАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕССЛЕРА

Введение

Синтез систем иденификации для сложных нелинейных динамических систем всегда был сложной задачей. Невозможность построения аналитической зависимости значения идентифицируемого параметра от выхода объекта сильно ограничивает множество работоспособных методов идентификации. Наибольшую сложность для идентификации представляют системы динамического хаоса [1–3]. Даже лучшие в своем классе – методы адаптивно-поисковой идентификации [4] – в чистом виде оказываются в данном случае неработоспособными. Успешность построения системы идентификации для хаотических систем определяется наличием интегрального критерия, описывающего динамику системы и зависящего от идентифицируемых параметров.

В данной работе ставится задача синтеза критерия качества идентификации и построения системы адаптивно-поисковой идентификации для хаотической системы Ресслера [1–3].

Постановка задачи

Рассмотрим нелинейную динамическую систему Ресслера:

$$\begin{cases} \dot{x} = -y - z \\ \dot{y} = x + a * y \\ \dot{z} = b + z \cdot (x - c) \end{cases} . \tag{1}$$

Здесь x, y, z – переменные состояния системы, которые соответствуют концентрациям основных реагентов в моделируемой химической системе. Соответственно a, b, c – параметры, определяющие динамику системы (в моделируемой системе определяются константами химического равновесия и концентрациями вспомогательных реагентов).

При моделировании данной системы положим $a = 0.25$, $b = 1$. В этом случае параметр c определяет тип динамики системы. Определение значения данного параметра и будет целью задачи идентификации.

Выход объекта **O** (x_o) наблюдается с погрешностью $w(t)$ – случайным сигналом с равномерным распределением, амплитудой $w_a = 0.05$ и характерным временем автокорреляции $\tau_w = 0.1$. Выходы моделей M_t и M_b ($x_{mt}(t)$ и $x_{mb}(t)$) измеряется точно.

В данной системе нет внешнего входного сигнала $u(t)$. Это объясняется тем, что за счет поддержания постоянных концентраций вспомогательных компонент, постоянного пополнения исходных веществ и удаления

 ISSN 1562-9945

продуктов реакции система обладает собственным источником энергии, который обеспечивает динамику системы и при отсутствии внешнего воздействия.

Анализ свойств системы

Как и другие системы хаотической динамики, системаРесслера не позволяет построить систему идентификации, основанную на формировании критерия качества идентификации как меры близости непосредственных значений выходных сигналов объекта $x_0(t)$ и модели $x_m(t)$. Более того, сам вид поведения данной системы может значительно изменяться при малых изменениях параметров, совершая переход от хаотического к сложно - периодическому и обратно.

При малых значениях параметра ($c \approx 2$) система проявляет регулярную динамику, совершая колебательное движение вокруг точки неустойчивого равновесия. При увеличении значения параметра c происходит удвоение периода, поведение системы становится все более сложным, и в определенном диапазоне значений параметра система демонстрирует хаотическую динамику.

На рис. 1 приведены портреты динамики системы (1) при близких значениях параметра c, а на рис. 2 спектральные характеристики, построенные по значениям $x(t)$.

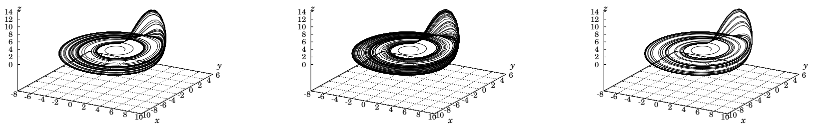

Рис. 1 – Портрет динамики системы при значениях параметра $c = 5.58$, $c = 5.59$ и $c = 5.60$

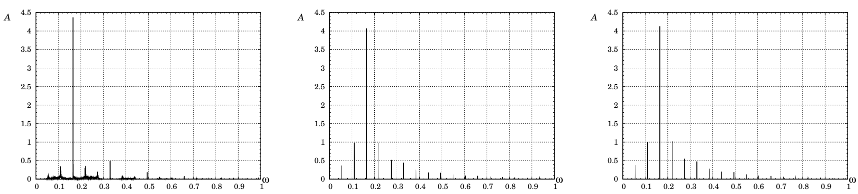

Рис. 2 – Спектр системы при $c = 5.58$, $c = 5.59$ и $c = 5.60$

При значении параметра $c = 5.58$ спектр системы имеет в определенных областях непрерывный характер, причем эта непрерывность сохраняется при моделировании на значительных временных интервалах. Это дает основания причислить систему к системам хаотической динамики. При увеличении параметра c всего на 0.2% спектр системы практически представляет собой набор ограниченного количества частот, и система демонстрирует сложно-периодическое движение. Однако на фазовом портрете при ограниченном интервале моделирования график визуально более плотно заполняет область аттрактора. При увеличении параметра c еще на 0.2% спектральная характеристика практически не изменяется, однако визуально наблюдается значительно менее плотное заполнение фазового пространства.

Следует отметить, что такое разделение видов динамики системы допустимо только в идеальном случае, когда полностью отсутствуют помехи, и система наблюдается неограниченное время. В случае ограниченного времени измерения нет возможности различить непрерывный спектр от ряда близко расположенных частот. Если же в самой системе (1) действуют малые неконтролируемые возмущения, то разница между хаотическим и сложно-периодическим движением практически исчезает.

При синтезе критерия идентификации для нелинейных систем Дуффинга и системы с сухим трением [5,6] удалось воспользоваться физическими характеристиками, зависящими от идентифицируемого параметра, и к тому же требующих особых ухищрений при измерении. Рассматриваемая в данной работе система (1) представляет собой модель гипотетической химической реакции, причем происходящей в особых условиях, практически не реализуемых. Это не дает воспользоваться очевидными законами сохранения или же другими физическими инвариантами для определения критерия, подходящего для построения работоспособной системы идентификации.

Вместе с тем, анализ как исходной системы уравнений, так и результатов численного моделирования, позволяет найти по крайней мере один из возможных работоспособных критериев. Прежде всего отметим, что идентифицируемый параметр c непосредственно входит только в уравнение для $z(t)$. Это дает основание предположить, что измерение именно этой переменной может дать ключ к построению критерия. В свою очередь, по результатами моделирования системы видно, что при периодическом режиме работы величина z мала. При этом, с увеличением значения параметра c наблюдается рост аттрактора вдоль оси z. В то же время, численный эксперимент показал, что значения таких интегральных величин, как $\overline{|z(t)|}$, $\overline{z^2(t)}$ недостаточно сильно зависят от параметра c. Это связано с тем, что $z(t)$ характеризуется нерегулярными острыми пиками и значительную часть времени функция принимает значения, много меньше, чем в максимумах пиков (рис. 3).

Исследования показали, что максимальная высота пиков, измеренная на достаточно большом интервале, проявляет в исследуемом диапазоне однозначную зависимость от идентифицируемого параметра (рис. 4). В связи с этим, данная величина $z_{\max}(c)$ может рассматриваться в качестве критерия идентификации в системе Ресслера.

Необходимое время измерения максимального значения $z(t)$ в рассматриваемой системе составляет порядка 50–150 периодов, соответствующих наиболее выраженной частоте в спектре системы. В то же время,

 ISSN 1562-9945

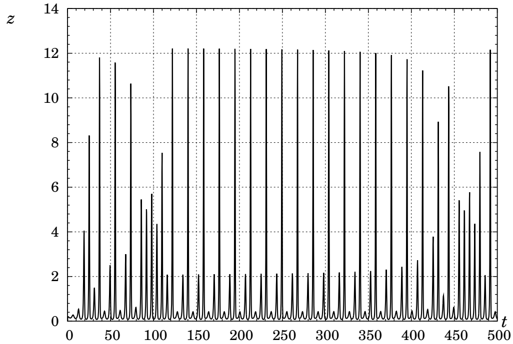

Рис. 3 – Характерный вид зависимости $z(t)$

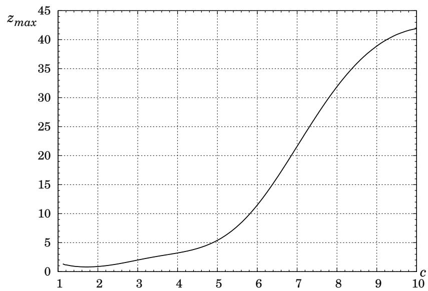

Рис. 4 – Зависимость $z_{\max}$ от c системы вида (1)

это не является гарантированной оценкой, так как для системы хаотической динамики нельзя точно предсказать, когда будет достигнут максимум какой-либо из переменных состояния.

Моделирование процесса идентификации

Для проведения идентификации был использован хорошо зарекомендовавший себя [5,6] метод адаптивно-поисковой идентификации с двумя моделями и двумя УГПК. Для формирования критерия качества выходы как моделей, так и объекта поступают в блоки, реализующие запоминание максимального значения. При этом данные блоки имеют дополнительные входы сброса. После появления ненулевого сигнала на этих входах поиск максимального значения начинается с нуля. В качестве сигнала сброса используется тот же самый сигнал, который используется для сброса пары УГПК в основной части системы идентификации. При этом величина рабочего шага τ метода идентификации автоматически становится временем поиска максимального значения $z(t)$.

На рис. 5 представлены результаты моделирования процессов идентификации параметра c.

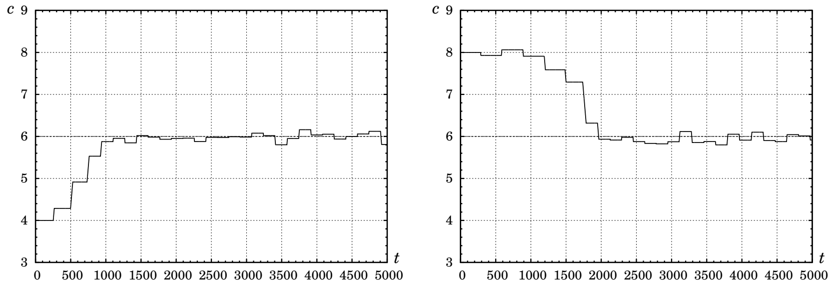

Рис. 5 – Результаты моделирования процесса идентификации для различных начальных значений c

Как и в случае хаотической системы Дуффинга, процесс идентификации занимает значительное время. Для данного факта можно выдвинуть несколько обоснований. Прежде всего, в данной работе критерий идентификации был выбран не на основе физических принципов работы системы, а из наблюдений за ее динамикой. Вполне вероятно, что существует другой критерий, позволяющий сравнить динамику двух систем вида (1) за меньшее время. С другой стороны, большая длительность процесса идентификации может быть общим свойством систем хаотической динамики, особенно если выход объекта наблюдается с ненулевой погрешностью.

Выводы

Для хаотической системыРесслера удалось определить критерий идентификации, позволяющий построить работоспособною систему идентификации, основанную на адаптивно-поисковом подходе. В отличие от системы идентификации нелинейного объекта с сухим трением и хаотической системы Дуффинга, критерий не был основан на очевидных физических принципах исходной системы. Тем самым в работе показано, что даже для тех систем, для которых нет возможности применить напрямую физический инварианты исследуемой системы, возможно построение системы идентификации.

Литература

1. *Магницкий Н.А., Сидоров С.В.* Новые методы хаотической динамики. – М.:Едиториал УРСС, 2004 – 320 с.
2. *Мун Ф.* Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров. – М.: Мир, 1990. – 312 с.
3. *Tamas Tel, Marton Gruiz*. Chaotic Dynamics. An Introduction Based on Classical Mechanics. – Cambridge University Press, 2006 – 388 с.
4. *Михалёв А.И., Гуда А.И.* Сравнительный анализ алгоритмов поисковой идентификации нелинейных систем // Адаптивные системы автоматического управления. – 2000. – № 3(23). – С. 99–108.

 ISSN 1562-9945

5. *Михалёв А.И., Гуда А.И., Новикова Е.Ю.* Синтез критерия идентификации нелинейных динамических систем на физических принципах // Адаптивные системы автоматического управления. – 2007. – № 11(31). – С. 136–142.

6. *Михалёв А.И., Гуда А.И.* Адаптивно-поисковая идентификация хаотической динамической системы Дуффинга // Адаптивные системы автоматического управления. – 2008. – № 12(32). – С. 166–171.

Получено 24.05.2009