УДК 656:51-7

СЛОЖНЫЕ СИСТЕМЫ: ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК, ВОЗМУЩЕНИЙ И ПОМЕХ

Гарькина И.А., Данилов А.М., Тюкалов Д.Е.

ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Пенза, Россия (440028, Пенза, ул.Германа Титова, 28), e-mail: fmatem@pguas.ru

Рассматриваются прямые и обратные задачи теории дифференциальных уравнений и теории управления, связанные с анализом и синтезом сложных систем. Указываются методы определения динамических характеристик системы и решения задачи идентификации помех с определением их локализации. Обсуждаются вопросы корректности постановки задач. Дается алгоритм решения уравнений идентификации для системы, находящейся под воздействием стационарных или стационаризируемых входных сигналов. Показывается, что норма ошибки решения уравнения идентификации в частотной области существенно зависит от распределения спектральной плотности входного сигнала: задача некорректна, если при произвольных бесконечно малых возмущениях исходных данных соответствующие возмущения решения не являются бесконечно малыми. Предложенный алгоритм прошел положительную апробацию при определении по данным нормального функционирования транспортной эргатической системы характеристик, как объекта, так и оператора.

Ключевые слова: сложные системы, анализ и синтез, формализованные методы, прямые и обратные задачи, идентификация динамических характеристик, внешних воздействий и внутренних помех.

COMPLEX SYSTEMS: IDENTIFICATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS, OF DISTURBANCES AND INTERFERENCE

Garkina I.A., Danilov A.M., Tyukalov D.E.

Penza state university of architecture and construction (Russia, 440028, Penza, Titov str., 28), e-mail: fmatem@pguas.ru

Presented the direct and inverse problems of the theory of differential equations and control theory (related to the analysis and synthesis of complex systems). Are proposed methods for determining the dynamic characteristics of the system and solve the problem of identification of interference; is determined by their location. Discusses the correct setting of tasks. Is given an algorithm for solving equations identification system under the influence of stationary input signals. It is shown that the error rate of the solution of the equation in the frequency domain identification depends essentially on the distribution of the spectral density of the input signal: the problem is incorrect, if for arbitrary infinitesimal perturbations of the initial data corresponding perturbation solutions are not infinitesimal. The proposed algorithm was tested positive in determination of the characterization, both the subject and the operator (according to the normal functioning of transport human-machine system).

Keywords: complex systems, analysis and synthesis, formal methods, direct and inverse problems, identification of dynamic characteristics, external influences and internal interference

Анализ и синтез сложных систем непосредственно связан с решением известных прямых и обратных задач. *В прямой задаче* предполагается определение с помощью операторного уравнения выходной координаты по известному возмущению, известным характеристикам помехи, оператору системы или ее звеньев (рис.1):

$$x_1(t) = W_2[x, n];$$

$x_1(t)$ – управляющий сигнал, $y(t)$ – выходная координата (реакция на управляющий сигнал), W – оператор объекта управления.

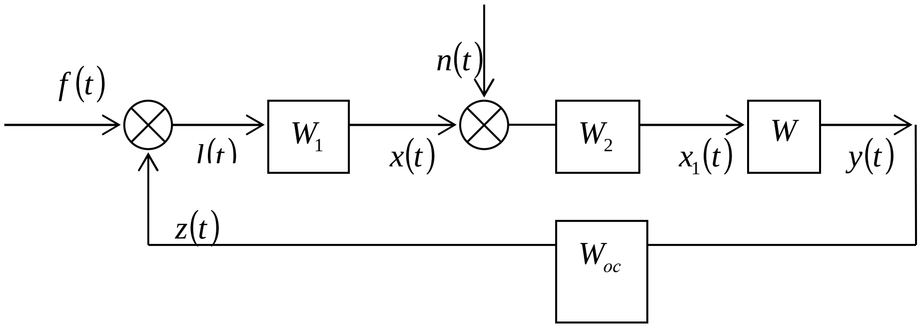

Рис.1. Система с возмущениями и помехами

С учетом взаимодействия управляющего сигнала и помехи:

$$x_1(t) = W_2[x, n].$$

Так что

$$y(t) = W[W_2[x, n]].$$

В системах с обратной связью управляющий сигнал $x(t)$ формируется по сигналу обратной связи $z(t)$ и возмущению $f(t)$, действующему на входе системы:

$$x(t) = W_1(z, f, t).$$

Таким образом, здесь

$$y(t) = W\{W_2[W_1(f, z, t); n]\}.$$

Две *обратные задачи* связаны с использованием реализации случайных процессов системы, регистрируемых в режиме ее функционирования. В *первой* задаче определяется оператор системы; она известна как *задача идентификации*. *Вторая* обратная задача связана с отысканием статистических характеристик внешних возмущений $f(t)$, действующих на систему, внутренних помех $n(t)$ и мест их локализации (*идентификация возмущений и помех*). К сожалению, одновременное решение этих двух задач невозможно [1,2, 3, 5].

Так, *идентификация динамических характеристик* может производиться лишь при наличии экспериментальных данных о сигналах и априорных сведений о внутренних помехах (необходимы в случаях, когда они коррелированы с внешними возмущениями). Во многих случаях данные о помехах могут быть получены априори только в режиме отладки систем при отсутствии внешних возмущений. Поэтому полученные в результате идентификации динамические характеристики системы могут отличаться от тех, которые соответствуют режиму функционирования системы.

При решении задачи *идентификации помех* необходимо иметь экспериментальные данные и знать динамические характеристики системы или ее звеньев. Очевидна необходимость использования метода итераций. Что касается методических вопросов идентификации возмущений и помех, действующих в сложных многомерных системах, в том числе с перекрестными связями, то удовлетворительного решения на сегодня нет.

Описание систем в частотной области оказывается более удобным и экономичным, особенно для стационарных систем. Здесь динамические характеристики и взаимная спектральная плотность не зависят от времени и возможно определение частотной характеристики идентифицированной системы по известным спектральным плотностям:

$$W(j\omega)=\frac{S_{xy}(j\omega)}{S_{xx}(\omega)}.$$

Однако при идентификации динамической системы, функционирующей задолго до момента анализа $t_0=0$ (накопление энергии к моменту $t_0=0$), возможно получение больших ошибок, связанных с влиянием погрешностей вычисления корреляционных функций, а затем и спектральных плотностей.

Основная сложность в решении уравнения идентификации связана с некорректностью задачи (даже при вычислении корреляционных функций и спектральных плотностей с высокой степенью точности). Действительно, импульсная переходная функция

$$\omega(\tau)=\frac{1}{2\pi}\int_0^\infty W(j\omega)e^{j\omega\tau}d\tau=\frac{1}{2\pi}\int_0^\infty \frac{S_{xy}(j\omega)}{S_{xx}(\omega)}e^{j\omega\tau}d\omega.$$

При ошибке $\pm\delta K_{xy}(\tau)$ вычисления взаимной корреляционной функции $K_{xy}(\tau)$ спектральная плотность также будет вычислена с ошибкой $\pm\delta S_{xy}(j\omega)$. Вместо истинной импульсной переходной функции получим ее оценку

$$\omega^*(\tau)=\frac{1}{2\pi}\int_o^\infty \frac{S_{xy}(j\omega)\pm\delta S_{xy}(j\omega)}{S_{xx}(\omega)}e^{j\omega\tau}d\tau;$$

норма ошибки

$$\left\|\omega-\omega^*\right\|=\frac{1}{2\pi}\int_o^\infty \frac{S_{xy}(j\omega)}{S_{xx}(\omega)}e^{j\omega\tau}d\omega.$$

Как видим, норма ошибки может быть как угодно большой в зависимости от распределения спектральной плотности $S_{xx}(\omega)$. Задача идентификации является не корректной. Для классически корректно поставленной задачи произвольно бесконечно малым возмущениям исходных данных должны соответствовать бесконечно малые возмущения решения. Если $S_{xx}(\omega)$ и $S_{xt}(j\omega)$ имеют нули одинаковой кратности в какой-либо конечной точке оси ω, то погрешность решения также может быть значительной. К сожалению, решение уравнения идентификации в частотной области принципиально возможно лишь для непрерывно и длительно функционирующих систем со стационарными или стационаризируемыми (нестационарные сигналы, корреляционные функции которых определяются двойным усреднением: сначала – по времени определяется $K_{xx}(\tau)$, а затем – по ансамблю $M[K_{xx}(\tau)]$) входными сигналами. Даже в этом случае возникают трудности из-за плохой обусловленности решения и связанной с этим некорректностью задачи. Корректность решения, в первую очередь, зависит от распределения спектральной плотности входного сигнала.

Для восстановления идентифицируемых характеристик в случаях, когда начало идентификации совпадает с началом функционирования системы, частотные методы, строго говоря, не применимы (нет возможности перехода к спектральным плотностям).

Для колебательных систем весьма актуально решение уравнения идентификации

$$W(j\omega)=\frac{1}{2\pi\Phi(j\omega)}\int_{0}^{\infty}e^{-j\omega\chi}d\chi\int_{-\infty}^{\infty}\frac{S_{xy}(\mu)}{\Phi(-j\mu)}e^{j\mu\chi}d\mu$$

для системы, находящейся под воздействием стационарных или стационаризируемых входных сигналов. Известно, корректность решения связана с выполнением условий:

- спектральная плотность $S_{xx}(\omega)=\dfrac{P(\omega)}{Q(\omega)}$ должна содержать четные степени ω, если степень числителя $P(\omega)$ меньше степени знаменателя $Q(\omega)$;

- знаменатель $Q(\omega)$ не должен иметь действительных корней и превращаться в нуль, или быть достаточно близок к нему;

- числитель $P(\omega)$ не должен иметь действительных корней;

- коэффициенты полиномов $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ должны быть действительными.

Точность идентификации будет тем больше, чем больше $Q(\omega)$ отличается от нуля при всех действительных ω в диапазоне исследуемых частот.

При решении ряда *задач виброзащиты* [6,7] нами использовался приводимый ниже алгоритм решения уравнения идентификации (система на подвижном основании со стационарным или стационаризируемым сигналом; моменты начала идентификации и функционирования совпадают).

1. Определение по экспериментальным данным корреляционной функции входного сигнала $K_{xx}(\tau)$ и взаимной корреляционной функции $K_{yx}(\tau)$.

2. Вычисление $S_{xx}(\omega)$.

3. Представление $S_{xx}(\omega)$ в виде $S_{xx}(\omega)=\dfrac{P(\omega)}{Q(\omega)}$;

$P(\omega)$ и $Q(\omega)$ – полиномы относительно ω, содержащие только четные степени относительно частоты ω ($S_{xx}(\omega)$ – четная функция).

4. Определяется частотная характеристика $\Phi(j\omega)=\dfrac{H(j\omega)}{F(j\omega)}$ так называемого формирующего фильтра ($S_{xx}(\omega)=\left|\dfrac{H(j\omega)}{F(j\omega)}\right|^2$). Для этого $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ разлагаются на множители; отбираются в полученных разложениях множители, соответствующие корням, расположенным в верхней полуплоскости комплексной переменной $(j\omega)$, добавляются к таким множителям $j^m\sqrt{A_{2m}}$ (A_{2m} – коэффициент при ω^{2m} в разложении полинома $P(\omega)$) и $j^n\sqrt{B_{2n}}$ (B_{2n} – коэффициент при ω^{2n} в разложении полинома $Q(\omega)$).

5. Определение спектральной плотности $S_{xy}(j\omega)$ по корреляционной функции $K_{xy}(\tau)$.

6. Наконец, определяется

$$W(j\omega)=\frac{1}{2\pi\Phi(j\omega)}\int_0^{\infty}e^{-j\omega\chi}d\chi\int_{-\infty}^{\infty}\frac{S_{xy}(\mu)}{\Phi(-j\mu)}e^{j\mu\chi}d\mu .$$

Справедливо:

$$P(\omega)=H(j\omega)H(-j\omega),$$

$$Q(\omega)=F(j\omega)F(-j\omega).$$

Предложенный алгоритм прошел положительную апробацию при определении характеристик, как объекта, так и оператора по данным нормального функционирования транспортной эргатической системы [4, 6-9].

Список литературы

1. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. Приближенные методы декомпозиции при настройке имитаторов динамических систем // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 150-156.
2. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М., Пылайкин С.А. Аналитическое определение имитационных характеристик тренажных и обучающих комплексов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6. – С. 698.
3. Гарькина И.А., Данилов А.М., Петренко В.О. Решение приближенных уравнений: декомпозиция пространственного движения управляемого объекта // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 190.
4. Гарькина И.А., Данилов А.М., Прошин И.А. Тренажеры модульной архитектуры для подготовки операторов транспортных систем // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – № 12 (16). – С. 37-42.

5. Данилов А.М., Гарькина И.А. Теория вероятностей и математическая статистика с инженерными приложениями: учебное пособие. – Пенза: ПГУАС, 2010. – 228 с.

6. Данилов А.М., Гарькина И.А., Гарькин И.Н. Спектральные методы при анализе динамических систем // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 3. – С. 109-113.

7. Данилов А.М., Гарькина И.А., Гарькин И.Н. Управление объектами на подвижном основании: оптимизация конструктивной и структурной схем // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 3. – С. 102-108.

8. Данилов А.М., Гарькина И.А., Петренко В.О. Оценка параметров сложных систем по временному и частотному представлениям выходных сигналов // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 4. – С. 121-126.

9. Данилов А.М., Лапшин Э.В., Гарькина И.А., Юрков Н.К. Принципы создания сложных управляемых динамических систем применительно к авиационным тренажерам // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2004. – № 2. – С. 53-57.

Рецензенты:

Родионов Ю.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация автомобильного транспорта», декан автомобильно-дорожного института ПГУАС, г. Пенза;

Кошев А.Н., д.х.н., профессор, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, г. Пенза.