

УДК 681.2:531.784.089

Козлов С.В., Науменко А.М., Черепашук Г.А.

Методы идентификации динамических характеристик
измерительно-регистрирующих систем.

Широкое использование динамических процессов в новейших технологиях, научных исследованиях, при испытаниях продукции и т.п. требует применения измерительно-регистрирующих систем (ИРС), с заданными или известными динамическими характеристиками. При этом к ИРС предъявляются все более жесткие требования по точности преобразования сигналов и их частотным диапазонам, а также объема регистрируемой измерительной информации. Типовая структура ИРС включает первичные аналоговые измерительные преобразователи (чувствительные элементы, нормирующие преобразователи, согласующие устройства и т.п.), вторичные системные преобразователи информации (коммутаторы, АЦП, линии связи, интерфейсы и т.п.) и накопители измерительной информации (магнитные и светолучевые регистраторы, НМЛ, НМД и т.п.). Все используемые в ИРС средства измерений должны воспринимать измеряемую физическую величину и обеспечить регистрацию полученной измерительной информации с точностью, не ниже заданной и практически не зависящей от диапазона частот входных сигналов, собственных динамических характеристик ИРС и влияющих факторов.

Динамические свойства ИРС влияют на результаты и погрешности измерений, а потому их необходимо знать для выбора соответствующих средств измерений и оценивания точности полученных результатов. Широкое применение получили прямые методы идентификации динамических систем, при которых определяются переходные характеристики по реакции на соответствующий испытательный входной сигнал (ступенчатый, дельта - импульсный, синусоидальный). Изме-

ряя сигнал на выходе исследуемой ИРС, можно выразить динамическую характеристику в аналитической форме, используя для этого численные методы.

Численный метод определения коэффициентов передаточной функции (ПФ) непрерывной стационарной устойчивой линейной модели типа "черного ящика" по отклику на ступенчатое воздействие основан на построении системы функций $f_m(t)$, где $m=1, \dots, 2p-1$; p - порядок системы, t - время, обладающих свойствами рекуррентности, линейности относительно неизвестных параметров, сходимости при возрастании параметра t .

Указанные свойства означают, что функции $f_m(t)$ можно представить в виде $f_m(t) = F_k(t, f_{m-1}(t), u(t), f_{m-1}, u, A_p, B_{p-1})$, где F - некоторый функционал, $k=1$ при $m=1$, $k=2$ при $m=2, \dots, 2p-1$; $u(t)$ - отклик модели на ступенчатое воздействие; f_{m-1}, u - установившиеся значения $f_{m-1}(t)$ и $u(t)$, соответственно ($f_0(t)=u(t)$, $f_0=u_0$); A_p - вектор коэффициентов порядка p знаменателя ПФ, B_{p-1} - вектор коэффициентов порядка $p-1$ числителя ПФ. ПФ модели имеет

вид:
$$W_p(s) = K \frac{B_{p-1}(s) + \Gamma}{A_p(s) + I},$$
 где K - статический коэффициент ПФ, s - оператор Лапласа.

Установившиеся значения f_m представляют собой линейные функции относительно как A_p и B_{p-1} ; так и u, f_1, \dots, f_{m-1} , что позволяет определить неизвестные параметры A_p и B_{p-1} как решение системы линейных уравнений с коэффициентами u, f_1, \dots, f_m .

На практике отклик модели представляется выборкой дискретных значений $u(t)$ в моменты времени nT_0 , где $n=0, \dots, N$; N - объем выборки; T_0 - выборочный период. При замене непрерывного параметра t на дискретный nT_0 предлагаемый метод обеспечивает определение

приближенных значений A_p и B_{p-1} , при условии, что значения $f_m(nT_0)$ и $U(nT_0)$ достаточно близки к установившимся значениям f_m и u , соответственно.

Точность оценок \hat{A}_p и \hat{B}_{p-1} , являющихся решениями системы линейных уравнений с коэффициентами $U(nT_0), f_1(nT_0), \dots, f_m(nT_0)$ зависит от объема выборки N и выборочного периода T_0 .

Применение данного метода для определения коэффициентов ПФ 3-го порядка вида

$$W_3(S) = \frac{b_1 S^2 + b_2 S + 1}{a_0 S^3 + a_1 S^2 + a_2 S + 1}$$

по дискретной выборке отклика $U(nT_0)$ на единичное ступенчатое воздействие приводит к следующей системе функций $f_m(nT_0)$:

$$\begin{cases} f_1(nT_0) = nT_0 - T_0 \sum_{i=0}^n u(iT_0) \\ f_m(nT_0) = T_0 f_{m-1}(nT_0) \sum_{i=0}^n u(iT_0) - T_0 \sum_{i=0}^n f_{m-1}(iT_0), \end{cases}$$

где $m = 2, \dots, 5$; $n=0, \dots, N$.

Установившиеся значения $f_m(nT_0)$ связаны с оценками коэффициентов ПФ соотношениями:

$$\begin{cases} f_1(nT_0) = \hat{a}_2 - \hat{b}_2 \\ f_2(nT_0) = f_1(nT_0) \hat{b}_2 - \hat{a}_1 + \hat{b}_1 \\ f_3(nT_0) = f_2(nT_0) \hat{b}_2 - f_1(nT_0) \hat{b}_1 + \hat{a}_0 \\ f_4(nT_0) = f_3(nT_0) \hat{b}_2 - f_2(nT_0) \hat{b}_1 \\ f_5(nT_0) = f_4(nT_0) \hat{b}_2 - f_3(nT_0) \hat{b}_1 \end{cases}$$

Решение полученной системы уравнений дает значения оценок коэффициентов ПФ 3-го порядка. Это решение можно проиллюстрировать численным примером путем задания значений коэффициентов ПФ эталонной модели, генерации дискретной выборки отклика эталонной модели на ступенчатое воздействие и расчета значений оценок

коэффициентов ПФ. Результаты расчетов представлены на рис.1.

Расчет выполнен с помощью программы, разработанной для предлагаемого метода, позволяющей получить оценки коэффициентов ПФ произвольного порядка, генерировать отклики фиксированного набора эталонных моделей, анализировать результаты с учетом случайных погрешностей и шумов измерений с различными законами распределения и обладающей развитым графическим интерфейсом.

Результаты, полученные при оценке коэффициентов ПФ модели, могут быть использованы для приближенного отражения динамических свойств реальных объектов, построения частотных характеристик, функций чувствительности и т.п.

Распространение метода на модели произвольного порядка приводит к некоторым обобщениям: во-первых, вид функционалов F_1 и F_2 не зависит от порядка ПФ модели; во-вторых, система линейных уравнений относительно $A_p, B_{p-1}(\hat{A}_p, \hat{B}_{p-1})$ является треугольной или ганкелевой (в зависимости от способа представления A_p, B_{p-1} или \hat{A}_p, \hat{B}_{p-1}), для решения которой разработаны эффективные и быстрые алгоритмы.

Анализ влияния случайных погрешностей и шумов измерений на результаты оценивания коэффициентов ПФ по дискретной выборке $U(nT_0)$ показывает, что функции $f_m(nT_0)$ получают смещения, которые являются возрастающими по модулю функциями от nT_0 , а размах случайных выбросов $f_m(nT_0)$ убывает с ростом m . Коррекция функций $f_m(nT_0)$ может быть произведена введением дополнительных слагаемых в выражение для $f_m(nT_0)$ и компромиссом между объемом выборки N и выборочным интервалом T_0 , а также интерактивно, путем анализа графических данных $f_m(nT_0)$, предоставляемых программой обработки.

Для приводимого примера имитировались результаты скачкообразного нагружения конструкции при ее прочностных испытаниях. Измеренные значения получены с помощью 12-ти разрядного АЦП, имеющего время преобразования до 6 мкс и обеспечивающего накопление данных в ОЗУ.

Test Transfer Function:	Test Function Coefficients:	Additive Noise:
$W(s) = K \frac{T_3 s^2 + T_4 s + 1}{(T_2 s + 1)(T_1^2 s^2 + 2\beta T_1 s + 1)}$	$K = 1.0$	None
Process Parameters:	$T_1 = 0.095$	
Input Step:	$\beta = 0.425$	
$X = 1$	$T_2 = 0.220$	
Sample Size:	$T_3 = 0.275$	
$N = 1000$	$T_4 = 0.416$	
Time Step, Sec:	$W(s) = K \frac{B(s)+1}{A(s)+1}$	Function Form Coefficients:
$T_D = 0.006$	Actual Values:	Estimate Values:
Total Time, Sec:	$K = 1.0000000$	$K = 1.0000000$
$T_N = 6.000000$	$a_0 = 0.00198550$	$a_0 = 0.00208677$
Response Extremes: $T, Y(T)$	$a_1 = 0.02679000$	$a_1 = 0.02681913$
Max: 0.102000, 6.392123	$a_2 = 0.30075000$	$a_2 = 0.29769321$
Min: 0.396000, -2.039766	$b_1 = 0.27500000$	$b_1 = 0.27365707$
Response: $Y(T)$	$b_2 = 0.41600000$	$b_2 = 0.40952770$
	Error Values:	
		0.000%
		5.100%
		0.109%
		-1.016%
		-0.488%
		-1.556%

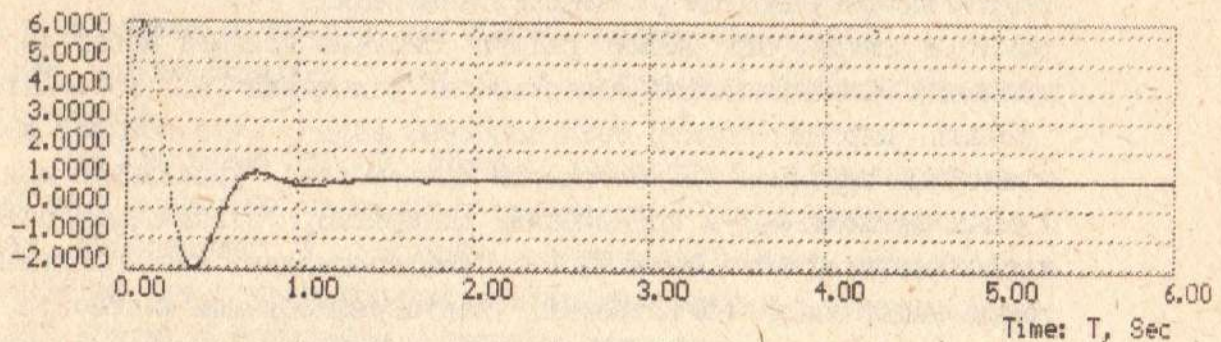


Рис. I

Определение коэффициентов передаточной функции по данным переходного процесса.