Идентификация динамики объектов управления в комплексе программных средств проектирования систем цифрового управления (ПСПСЦУ)

С.М. Вертешев,
зав. каф. ИСТ, д.т.н., проф.,
В.А.Коневцов
с.н.с. каф. ИСТ, к.т.н., с.н.с., kafedravt-ist@mail.ru
ПсковГУ, г. Псков

В докладе дана краткая характеристика комплекса программных средств проектирования систем цифрового управления (ПСПСЦУ), рассмотрены математические зависимости, дающие возможность программной реализации в таком комплексе метода идентификации линейных или линеаризуемых объектов, которые обладают свойствами запаздывания и самовыравнивания. На основе критерия оценки отклонения переходной функции объекта от переходной функции модели получены рекуррентные выражения для определения параметров модели.

A brief description of a Complex of Software Design of Digital Control Systems (Complex SDDCS) is described in the report. The authors write mathematical expressions for the method of identifying linear or linearizable Objects. These mathematical expressions provide the opportunity to create a software product for the Complex SDDCS. The criterion for estimating the deviation of the object's transition function from the transitional function of the model makes it possible to obtain recurrent expressions for determining the parameters of the model.

Комплекс программных средств проектирования систем цифрового управления (комплекс ПСПСЦУ) является программным средством разработки цифровых систем автоматического управления и регулирования технологическими процессами. Структура комплекса ПСПСЦУ и его преимущества по сравнению со средствами стандарта Международной электротехнической комиссии МЭК 61131-3 описаны в публикациях авторов данного доклада [1-6].

Комплекс ПСПСЦУ позволяет производить разработку, моделирование (с целью отладки разрабатываемой системы) и непосредственное управление линейными и нелинейными промышленными объектами, в том числе при нечеткой информации [7]. Комплекс ПСПСЦУ нашел практическое применение, в частности, на объектах биохимического производства [1,8].

Комплекс ПСПСЦУ позволяет реализовывать различные методы идентификации объектов управления с использованием эталонных воздействий на объект. Ряд промышленных объектов обладает свойством нестационарности, что существенно усложняет управление. Комплекс ПСПСЦУ позволяет производить идентификацию работающего объекта в режиме реального времени и формировать соответствующее управление. Для этого время работы объекта разбивается на интервалы квазистационарности. .

Свойства объектов с самовыравниванием могут быть описаны инерционными звеньями n+1 порядка с запаздыванием [9]:

$$G(p) = Y(p)/X(p) = e^{-p\tau}\Big/\left\{(pT+1)^n(pkT+1)\right\}, \tag{1}$$

В качестве пробного сигнала на входе объекта используется ступенчатая функция. Мерой близости между переходной функцией **h**(t) модели объекта и переходной функцией объекта может быть принят интеграл:

$$I = \int_0^{T_u} e(t)\,dt, \tag{2}$$

где $e(t) = h_0(t) - y$ – функция отклонения переходной функции объекта от переходной функции модели объекта.

Для нахождения параметров модели (1) в работе [9] использовано разложение (1) в ряд Тейлора и получены рекуррентные зависимости:

$$I_{l-1} = (T_l - T_{l-1})n + \tau_l - \tau_{l-1} + (k_l T_l - k_{l-1}T_{l-1}) \tag{3}$$

$$T_i = T_{i-1} + I_{j-1}/n. \tag{4}$$

$$k_i = k_{i-1} + I_{i-1}/T. \tag{5}$$

$$\tau_i = \tau_{i-1} - I_{i-1}. \tag{6}$$

Ряд промышленных объектов обладает динамическими свойствами без самовыравнивания [10], эти свойства можно представить передаточной функцией:

$$G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{e^{-p\tau}}{p(pT+1)^n(pkT+1)}, \tag{7}$$

отличающейся от модели (1) наличием интегрирующего звена. В качестве пробного сигнала таких объектов (уровень жидкости в сборнике) может быть использован одиночный прямоугольный импульс допустимой длительности и амплитуды.

Метод идентификации, изложенный выше, применим и для случая исследования объектов без самовыравнивания. Только после разложения в ряд Тейлора получаются рекуррентные выражения оценки параметров, учитывающие длительность импульса пробного сигнала λ

$$I_{i-1}/\lambda = n\left(T_i - T_{i-1}\right) \text{ при } \tau = k = 0 \quad (8)$$

$$I_{i-1}/\lambda = n\left(T_i - T_{i-1}\right) + \left(\tau_i - \tau_{i-1}\right) \text{ при } k = 0 \quad (9)$$

$$I_{i-1}/\lambda = n\left(T_i - T_{i-1}\right) + \left(k_i T_i - k_{i-1} T_{i-1}\right) \text{ при } \tau = 0 \quad (10)$$

$$I_{i-1}/\lambda = n\left(T_i - T_{i-1}\right) + \left(\tau_i - \tau_{i-1}\right) + \left(k_i T_i - k_{i-1} T_{i-1}\right) \quad (11)$$

при $k \neq 0$, $\tau \neq 0$

Оценка качества идентификации осуществляется по тому же критерию, что и в случае исследования объектов со свойствами самовыравнивания. По тому же алгоритму вычисляются значения параметров модели (7) с тем лишь отличием, что вычисляется не переходная функция модели объекта, а весовая функция

Более широкий класс объектов можно представить передаточной функцией модели:

$$G(p) = \frac{K_0 e^{-p\tau}}{p(pT+1)^n (pkT+1)\left(p^2 + bp + c\right)}, \quad (12)$$

где K_0, **τ**, T – параметры соответственно усиления, запаздывания, инерционности объекта; k – безразмерный коэффициент передаточной функции объекта; b, c – параметры звена второго порядка; n – кратность корней характеристического уравнения

Постановка задачи идентификации по модели (12) формулируется следующим образом: по измеренным значениям реакции объекта $y_э(t)$ на входное воздействие $x(t)$ вычислить такие параметры K_0, τ, T, k, b, c, n по модели (12), чтобы при соблюдении ограничений $K_{0p} \neq 0$, $\tau_p \geq 0$, $T_p \geq 0$, $0 \leq k_p < 1$, $b_p > 0$, $c_p > 0$, $4c_p - b^2_p > 0$, n_p – натуральное число, функционал [11]:

$$I = \int_0^{Tu} \left|Y_э(t) - Y_p(t)\right| dt \quad (13)$$

с заданной точностью достигал минимального значения.

Здесь $y_э(t)$ и $y_p(t)$ значения соответственно экспериментальной и расчетной реакций, T_u – время измерения реакции объекта. Если канал исследования не обладает интегрирующими свойствами, то в качестве входного $X(t)$ применяется ступенчатое воздействие амплитуды F. При интегрирующем свойстве канала в качестве входного воздействия $X(t)$ применяется прямоугольный импульс длительности λ амплитуды F. Коэффициент усиления K_o в соответствии с моделью (12) определяется из условия $t \to \infty$, $K_0 = y_э(\infty)/F$.

Для решения поставленной задачи идентификации выбран метод поисковой оптимизации [12], определены аналитические выражения для вычисления значений $y_p(t)$ расчетной реакции и предложен алгоритм выбора начальной точки поиска оптимума в пространстве координат параметров. Для поиска используется метод вращающихся координат Розенброка с применением процедуры ортогонализации Грамма-Шмидта [12].

Выражение для вычисления $y_p(t)$ на основе модели (12) находится путем применения теоремы разложения преобразования Лапласа к изображению [13]:

$$Y_p(p) = \frac{e^{-p\tau}}{p(pT+1)^n (pkT+1)(p-p_1)(p-p_2)} X(p), \quad (14)$$

где $p_{1,2} = -\frac{b}{2} \pm j\frac{d}{2}$; $d = \sqrt{4c - b^2}$; $X(p)$ – изображение входного воздействия.

Если канал с интегрирующим свойством, то на его вход подается воздействие в форме прямоугольного импульса, изображение которого имеет вид:

$$X(p) = \frac{1 - e^{-p\lambda}}{p},$$

где λ длительность импульса.

В результате преобразований выражения (14), после подстановки в него выражения (5), по формуле разложения Лапласа [13] получается аналитическое выражение для вычисления выражения $y_p(t)$:

$$y_p(t) = \frac{1}{kT^{n+1}}\left[y(t) - y(t-\lambda)\right] \quad (15),$$

где: $$y(t) = \frac{kT^{n+1}}{c}\left(t - \tau - nT - kT - \frac{b}{c}\right) + k^2T^2\left(\frac{T}{k-1}\right)^n \frac{e^{-\frac{t-\tau}{kT}}}{B^2 + \frac{d^2}{4}} + \frac{2Q}{kT\rho^n R}\left(\alpha_2 \cos\gamma + \beta_2 \sin\gamma\right) + Z(t)$$

$$B = \frac{b}{2} - \frac{1}{kT};\ Q = e^{-\frac{b(t-\tau)}{2}};\ \rho = \sqrt{A^2 - \frac{d^2}{4}};\ A = \frac{1}{T} - \frac{b}{2};\ R = \alpha_2^2 + \beta_2^2;$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 \cos n\psi + \beta_1 \sin n\psi;\ \beta_2 = \alpha_1 \sin n\psi - \beta_1 \cos n\psi;$$

$$\alpha_1 = \frac{bd^2}{4} - \frac{Bd^2}{2};\ \alpha_1 = \frac{bd^2}{4} - \frac{Bd^2}{2};\ J = \frac{d(t-\tau)}{2};\ \psi = arctg\frac{d}{2A};$$

$$Z(t) = \begin{cases} 0 \ \text{при} \ n = 0 \\ \frac{kT^2}{k-1}\frac{e^{-\frac{t-\tau}{T}}}{A^2 - \frac{d^2}{4}} \ \text{при} \ n = 1 \\ \lim\limits_{t \to -\frac{1}{T}} \frac{1}{(n-1)!}\left(\sum\limits_{r=0}^{n-2} C_{n-2}^r E^{(n-2-r)} D^{(r)}\right) \ \text{при} \ n \geq 2 \end{cases}$$

C_{n-2}^r – сочетания из (**n**-**2**) по **r**;

$$E = \frac{e^{p(t-\tau)}}{\left(p + \frac{1}{kT}\right)\left[\left(p + \frac{b}{2}\right)^2 + \frac{d^2}{4}\right]p2}$$

$$D = t - \tau - \frac{1}{p - kT} - \frac{2\left(p + \frac{b}{2}\right)}{\left(p + \frac{b}{2}\right)^2 + \frac{d^2}{4}} - \frac{2}{p};$$

$y(t-\lambda)$ – функция ***$y(t)$***, сдвинутая вправо на ширину импульса λ.

Если канал исследования не обладает интегрирующим свойством, то на его вход подается ступенчатое воздействие, изображение которого имеет вид

$$X(t) = \frac{1}{p}.$$

Идентификация параметров **τ_p, T_p, k_p, b_p, c_p, n_p** осуществляется путем поиска их значений из начальной точки (**τ_0, T_0, k_0, b_0, c_0, n_0**) с использованием поискового метода Розенброка [12] в системе координат (**τ, T, k, b, c, n**). После каждого цикла последовательных спусков вдоль системы ортонормальных направлений путем подстановки значений параметров **τ_p, T_p, k_p, b_p, c_p, n_p** в выражения (5) или (9.69) вычисляются значения ***$y_p(t)$*** и определяются очередные значения критерия (13). Если функционал (13) с заданной точностью не достигает экстремума, то поиск продолжается после поворота системы координат с помощью процедуры ортогонализации Грамма-Шмидта.

Скорость сходимости методов поисковой оптимизации зависит от близости выбора начальной точки поиска к области точки экстремума. Без соответствующего подбора начальной точки поиска метод Розенброка, как и другие методы поисковой оптимизации, не дает приемлемой скорости сходимости. Выбор этого метода мотивировался только тем, что для его применения не нужно вычислять производные функции многих переменных.

Для обеспечения приемлемой скорости сходимости (необходимо, чтобы время поиска было меньше, чем интервал квазистационарности переходного процесса) предложен алгоритм вычисления ряда координат начальной точки поиска (**τ_0, T_0, k_0, b_0, c_0, n_0**) при идентификации по модели (12), исходя из предельных теорем преобразования Лапласа и на основе анализа формы кривой реакции объекта.

Из (5) видно, что $\lim\limits_{t \to \infty} y_p(t) = \lambda / c$, т.е. $c = \lambda / y_p(\infty)$. Следовательно, при соблюдении ограничений, указанных в постановке задачи, начальное (и оптимальное) значение **c_0** параметра **c_p** вычисляется однозначно, т.е. $c_0 = c_p = c$. При ступенчатом воздействии, исходя из (9.69), и при ***$t \to \infty$*** получим $c = 1/y_p(\infty)$.

Значение **τ_0** оценивается по начальной области изменения измеренной реакции объекта, причем τ_0 выбирается таким, что $\left|y_э(\tau_0)\right| \leq \delta$, где δ – коэффициент, определяемый шумом канала измерения и процесса.

Начальное значение b_0 параметра b оценивается, исходя из выражения $d = \sqrt{4c - b^2}$, где $d = 2\pi/\Theta$ – круговая частота и Θ – оцененное значение периода колебания измеренной кривой реакции объекта, по формуле $b_0 = \sqrt{4c - (2\pi / \Theta)^2}$.

Начальными значениями T_0 и k_0 для очередного участка квазистационарности являются оптимальные значения T_p, k_p, полученные при идентификации на предыдущем участке. Ввиду того, что параметр n является натуральным числом, его оптимальное значение определяется путем подбора n_0**=0, 1, 2,…**в каждом цикле вычисления значения критерия (13). Перед вычислением или заданием начальной точки поиска оптимальных параметров осуществляется выбор структуры искомой передаточной функции по форме измеренной реакции объекта на входное воздействие. Если объект не обладает колебательными свойствами (это очень просто определяется по значениям реакции из знакопеременности функции $\varphi(t) = y_э(T_u) - y_э(t)$, начиная с той точки измерения, в которой с начала переходного процесса впервые выполняется неравенство $y_э(T_u) - \delta \le y_э(t) \le y_э(T_u) + \delta$, то в структуре передаточной функции имеем параметры (τ, T, k, n). В противном случае в структуре искомой передаточной функции имеем полный набор параметров модели (12). После автоматического определения структуры передаточной функции объекта осуществляется вычисление или задание начальной точки поиска, а затем собственно поиск параметров по критерию (13). Значение критерия (13) так же может быть задано, и чем оно больше, тем больше скорость сходимости, но и тем грубее будет оценка значений параметров.

На основе изложенного подхода разработан алгоритм идентификации [11]. Сначала выбирается структура передаточной функции на основе анализа знакопеременности $\varphi(t)$, затем определяется начальная точка поиска ($\tau_0, T_0, k_0, b_0, c_0, n_0$), осуществляется поиск значений параметров в точках ($\tau_p, T_p, k_p, b_p, c_p, n_p$) и вычисление (13). Если значение критерия достигает необходимого экстремума, то поиск прерывается, иначе повторяется шаг поиска и вычисление критерия.

Заключение

Рассмотренное в докладе математическое описание моделей промышленных объектов может быть реализовано в виде прикладного программного обеспечения для решения задач идентификации объектов в комплексе ПСПСЦУ

Область применения рассмотренных методов в комплексе ПСПСЦУ для идентификации нестационарных объектов ограничена соотношением между быстродействием комплекса, инерционностью объекта и интервалом квазистационарности.

Литература

1. Вертешев С.М., Коневцов В.А. Автоматизация проектирования цифровых систем управления: Монография. – Псков: Псковский государственный университет, 2017. –466 с.
2. С.М. Вертешев, В. А Коневцов Комплекс программных средств проектирования систем цифрового управления (комплекс ПСПСЦУ) // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2015) Труды международной конференции 26-28 октября 2015, М. ИПУ РАН 2015, с. 52-55.
3. Коневцов В.А., Казаченко А.П., Бабаянц А.В. МикроДАТ. Программные средства цифрового управления.- М.: ЦНИИТЭИприборостроения, Каталог ГСП, 1985, том 4, вып. 5,6, с. 1-70.
4. Коневцов В.А., Казаченко А.П., Литвинова Л.М., Бунин А.Б. Модифицированные средства цифрового управления.- М.: Информприбор, Каталог ГСП, 1987, том 4, вып. 10, 11, 12, с. 1-112.
5. Verteshev S., Konevtsov V. Direct Digital Control in a Complex of Software Design of Digital Control Systems // Environment. Technology. Resourses: Proceeding of the 11-th International Scientific and Practical Conference. June 15-17, 2017. Volume III. Rezekne: Rezekne Academy of Technologies, 2017. P. 337-342
6. Вертешев С. М., Коневцов В.А. Программное средство автоматизации объектов переменной технологии // Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании "ИНФОТЕХ – 2017": Сборник статей всероссийской научно-технической конференции, г. Севастополь: СевГУ, 2017. С. 52-57
7. Verteshev S., Konevtsov V. Processes Control with Fuzzy Initial Information in a Complex of Software Design of Digital Control Systems // Environment. Technology. Resourses: Proceeding of the 11-th International Scientific and Practical Conference. June 15-17, 2017. Volume III. Rezekne: Rezekne Academy of Technologies, 2017. P. 332-336
8. Вертешев С.М., В.А. Коневцов В. А. Автоматизация объектов переменной технологии // Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании "ИНФОТЕХ – 2017": Сборник статей всероссийской научно-технической конференции, г. Севастополь: СевГУ, 2017. С. 49-51
9. Moneman E., Duros I., Mikles I. Approximation von Übertragungsfunktionen mit Hilfe des Digitalrechners.- Regelungstechnik und Prozessdatenverarbeitung, 1978, №6, s.261-267.
10. Коневцов В.А., Фомин А.М., Аванесова Т.А. Идентификация передаточной функции по реакции объекта на импульсное прямоугольное воздействие.- Киев, ПКБ АСУ, СОФАП, 1982, 1533.00275-01.
11. Бабаянц А.В, Коневцов В.А. Идентификация динамических характеристик процессов микробиологического синтеза с помощью УВК.- Автоматика и телемеханика, 1982, №3, с. 79-86.
12. Jacob H.G. FORTRAN-Programm zur Ermittlung eines lokalen Optimums einer beschränkten multivariablen Gütefunktion ohne Kenntnis ihrer Ableitungen.- PDV-Berichte, 1975, №36, s. 38.
13. Араманович И.Г., Лунц Г.А., Эльсгольц Л.Э. Функции комплексного переменного. Операционное исчисление. Теория устойчивости.- М.: Наука, 1965, с.392.