УДК 62–501.224:681.3

В.И. ЛИТВИНЕЦ, ст.науч.сотр.,
В.Б. РУБАХИН, канд.техн.наук,
В.И. НАЗАРОВ, мл.научн. сотр. (БПИ)

ОЦЕНКА ВРЕМЕННОЙ ПОГРЕШНОСТИ АППРОКСИМАЦИИ КРИВЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫМ МЕТОДОМ МОМЕНТОВ

Множество технологических объектов автоматизации в энергетике, машиностроении и других отраслях обладают динамическими свойствами, которые могут быть представлены в моделях как объекты второго и более высоких порядков, характеризующиеся запаздыванием различного вида. При их описании используются известные методы аппроксимации [1, 2] кривых разгона с допустимой точностью, что позволяет выполнить расчет настройки автоматических систем регулирования (АСР) на заданную степень устойчивости. Однако реализация расчетных параметров при наладке систем часто требует значительных поправок, объясняемых в большинстве случаев некорректно выполненными экспериментами при определении динамических характеристик объекта. Возможной причиной считают также несистематические флуктуации неконтролируемых переменных, взаимосвязь которых с основными параметрами обусловливает нежелательные изменения качества регулирования.

Автоматизация объектов с широкой взаимозависимостью параметров требует учета различных возмущающих факторов. При этом АСР, проектируемые для обеспечения высокой точности регулирования, отличаются наличием сложных связей, использованием производных контролируемых параметров. Для общего случая целесообразно произвести оценку временной погрешности аппроксимации, позволяющую выполнить анализ работы системы, а также качество работы ее элементов в различных стадиях переходного процесса. Для определенной группы объектов с запаздыванием максимальная величина временной погрешности определена [3] в зависимости от параметров передаточной функции известного порядка. Представляет интерес зависимость временной погрешности от допущений аппроксимации кривых разгона тех параметров, производные которых используются в сложных АСР. На рис. 1 приведены кривые разгона экспериментальной $h(t)$ и аппроксимирующей $g(t)$ функций в одном из часто встречающихся вариантов, а ниже — соответствующая им кривая временной погрешности δ_t.

Следует отметить, что различия экспериментальных кривых и реакции модели чаще всего оцениваются по суммарному квадратичному критерию

$$I = \int_0^T \varepsilon^2(t)\,dt ,$$

где ε — ошибка аппроксимации (по ординате); t — время.

Временная погрешность вычисляется для момента t при некотором значении h_0 ординаты экспериментальной $h(t)$ и аппроксимирующей $g(t)$ функцией

$$\delta_t = \frac{t_h - t_g}{t} = \frac{\Delta t}{t} . \qquad (1)$$

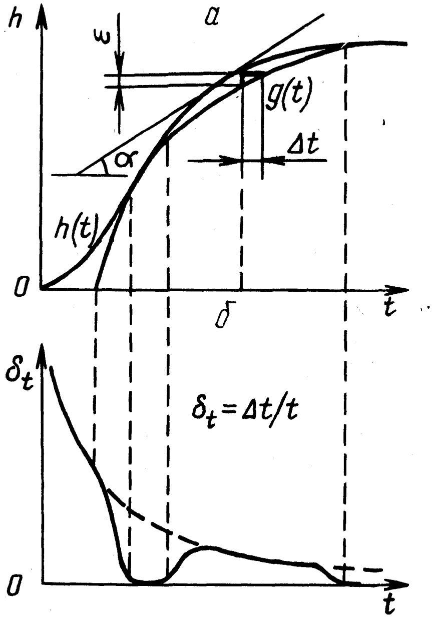

Рис. 1. Экспериментальная h (t) и аппроксимирующая g (t) кривые разгона (а) и кривая временной погрешности δ_t аппроксимации (б).

Учитывая, что обе ошибки связаны между собой соотношением

$$\mathrm{tg}\,\alpha = \frac{\;}{\Delta t} \approx h(t)\,, \qquad (2)$$

где α — угол наклона касательной (или хорды интервала) в каждой точке сравнения кривых (рис. 1), можно определить зоны и величину нежелательного увеличения временной погрешности произвольной контролируемого параметра. Вычисление относительного зрения последней производим в начальный период протекания переходного процесса, так как именно здесь относительная величина временной погрешности достигает максимума и, сознательно допуская ошибку при аппроксимации, мы заранее не используем полезный сигнал производной, закладываем соответственно погрешность в расчет параметров настройки и не получаем желаемого качества регулирования.

Используя уравнения (1) и (2), определим временную погрешность через величину ошибки ε и значение производной параметра $h^{\prime}(t)$:

$$\delta_t = \frac{\varepsilon}{h^{\prime}(t)\;t} = \frac{h(t) - g(t)}{h(t)\;t}\,.$$

Интегральный критерий от временной погрешности аппроксимации

$$I_t = \int_0^T \delta_t\, dt \qquad (3)$$

представляет собой комплексную величину, отражающую основные соотношения характерных значений исходной и полученной кривых, включая скорость изменения контролируемого параметра, что особенно важно в начальный момент переходного процесса.

Представляя аппроксимирующую функцию в виде суммы ряда ортонормированных функций [4]

$$g(t) = \sum_{i=0}^{\infty} c_i \varphi_i(t)\,, \qquad (4)$$

где c_i — ортогональная спектральная характеристика сигнала; $\{\varphi_i(t)\}$ — система ортонормированных функций, выполним ряд преобразований, позволяющих упростить критерий (3) до аналитически удобной формы, пригодной для использования в расчетах на ЭВМ. Так как функция g (t) соответственно выражению (4) определена на интервале [0, ∞]

$$I_t = \int_0^\infty \frac{\varepsilon}{h'(t)\,t}\,dt = \int_0^\infty \frac{h(t)}{h'(t)\,t}\,dt - \int_0^\infty \frac{\sum\limits_{i=0}^{\infty} c_i\,\varphi_i(t)}{h'(t)\,t}\,dt .$$

Полагая $[1/h'(t)\,t] = f(t)$, находим ортогональную спектральную характеристику $\{\xi_i\}$ функции f (t) относительно того же базиса ортонормированных функций $\{\varphi_i(t)\}$:

$$\xi_i = \int_0^\infty \frac{\varphi_i(t)}{h'(t)\,t}\,dt = \int_0^\infty f(t)\,\varphi_i(t)\,\omega(t)\,dt .$$

При этом следует считать, что функция $\varphi_i(t)$ ортогональна на интервале [0, ∞] с весом $\omega(t) = 1$. Добиваясь наиболее полного совпадения исходной и аппроксимирующей кривых для конечных пределов интегрирования получаем соотношение

$$I_t = \int_0^T h(t)\,f(t)\,dt - \sum_{i=1}^{n} c_i\,\xi_i => 0, \qquad (5)$$

позволяющее использовать его в качестве критерия аппроксимации с использованием ЭВМ. Алгоритм расчета аппроксимирующих функций включает следующие этапы:

— выполнение численного дифференцирования заданной кривой h (t) и определение функции f (t) ;

вычисление интеграла $\int_0^T h(t)\,f(t)\,dt$ на принятом интервале;

— определение значений моментов функций h (t) и f (t) относительно принятого базиса $\{\varphi_i(t)\}$ как интервала

$$\mu_k^h = \int_0^T h(t)\,e^{-kt}\,dt \quad \text{и} \quad \mu_k^f = \int_0^T f(t)\,e^{-kt}\,dt ,$$

где масштабный коэффициент k определяется как

$$k = \frac{\ln y}{x} .$$

Здесь $x = bt_k$ и $y = ah_k$, где h_k и t_k — координаты кривой разгона h (t) в момент наступления установившегося режима; a и b — постоянные коэффициенты, зависящие от формы кривой разгона.

Задавшись определенным видом ортонормированных функций (например, полином Лежандра), рассчитываем значения коэффициентов c_i и ξ_i;

— по критерию (5) определяем точность аппроксимации.

Таким образом, сильная зависимость функционала (5) от производной исходной кривой разгона нормирует приближение аппроксимирующей функции к заданной без пересечений последней и повышение порядка искомой функции производится до требуемой точности. Следует отметить, что использование предлагаемого критерия с ортогональной системой экспоненциальных функций позволяет удовлетворительно выполнить аппроксимацию кривых разгона любого вида (S-образных, импульсных и др.) до 3–4-го порядка.

Выводы

Использование временной погрешности в оценке точности аппроксимации, определенной как функция ординатной ошибки, времени интегрирования и производной заданной кривой, снижает объем вычислительных операций, обеспечивает высокую точность и сходимость исходной аппроксимирующей функции. Применение полученного критерия свободно от ограничений по характеру кривых разгона, а по качеству превосходит интегральный квадратичный критерий ошибки в области малых времен. Предлагаемый критерий не исключает применение его модификаций в частотной области, а также — во временной с различными ортогональными функциями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. Пер. с польск. — М.: Машиностроение, 1974. — 328 с. 2. Балакирев В.С., Дудников Е.Г., Цирлин А.М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. — М.: Энергия, 1967. — 232 с. 3. Ицхоки Я.С. Приближенный метод анализа переходных процессов в сложных линейных цепях. — М.: Советское радио, 1969. — 176 с. 4. Солодовников В.В., Дмитриев А.И., Егупов Н.Д. Ортогональный метод анализа и синтеза линейных систем автоматического управления на основе понятия моментов. — В сб.: Автоматическое управление и вычислительная техника. М.: Машиностроение, 1968, вып. 8, с. 30–86.

УДК 621.1.016

В.К. СУДИЛОВСКИЙ, канд.техн.наук,
Ю.В. МУЛЕВ, инженер,
В.В. КРАВЕЦ, инженер,
В.В. БОБРОВ, студент (БПИ)

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНТАЛЬПИЙ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА ПО ЛИНИИ НАСЫЩЕНИЯ

Зачастую при проведении экспериментальных работ и эксплуатационных испытаний теплоэнергетического оборудования и дальнейшем осуществлении теплотехнических расчетов определяются и используются величины энтальпий воды и водяного пара по линии насыщения. Так как на линии насыщения температура и давление пара связаны однозначно, то определение энтальпий воды и водяного пара можно осуществлять по любому из этих параметров. Однако как экспериментатору, так и эксплуатационнику важно при этом достичь оптимальной степени точности, что приводит к необходимости выбора измеряемого параметра, типа измерительного прибора и его класса точности. До сих пор решение такого вопроса осуществляется интуитивно, так как на него отсутствует обоснованный ответ.